



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola

Rafaella Pironato Amaro

**Estimativa da umidade do solo utilizando o método do
triângulo simplificado e imagens de satélite**

Campinas

2019



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola

Rafaella Pironato Amaro

Estimativa da umidade do solo utilizando o método do triângulo simplificado e imagens de satélite

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Agrícola** à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Orientadora: Gleyce Kelly Dantas Araújo Figueiredo

Campinas

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Am13e Amaro, Rafaella Pironato, 1996-
Estimativa da umidade do solo utilizando o método do triângulo simplificado e imagens de satélite / Rafaella Pironato Amaro. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Gleyce Kelly Dantas Araújo Figueiredo.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solo - Umidade. 2. Pastagens - Manejo. 3. Pecuária. 4. Soja. I. Figueiredo, Gleyce Kelly Dantas Araújo, 1984-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Estimation of soil moisture using the simplified triangle method and satellite images

Palavras-chave em inglês:

Soil - Moisture

Pasture - Management

Livestock

Soybean

Titulação: Bacharel em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Gleyce Kelly Dantas Araújo Figueiredo [Orientador]

Yane de Freitas da Silva

Daniela Fernanda da Silva Fuzzo

Data de entrega do trabalho definitivo: 03-12-2019



Estimativa da umidade do solo utilizando o método do triângulo simplificado e imagens de satélite

Rafaella Pironato Amaro

BANCA EXAMINADORA



Aprovado em: 03-12-2019



DEDICATÓRIA

Aos meus pais João Felix Amaro e Rosana Cristina Pironato Amaro, por serem meus maiores incentivadores e não medirem esforços para que eu chegasse até aqui. À minha irmã Julia Pironato Amaro, por ser minha melhor amiga e estar comigo todos os dias, mesmo que em cidades diferentes. Aos meus avós Amadeu Pironato, Leonor Pironato, Adib Amaro e Antonia Sônego Amaro por todo o carinho e inspiração. A todos os meus amigos que sempre me apoiaram e vivenciaram essa jornada ao meu lado. E aos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por preencher meus dias com força e bom ânimo.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram todo o suporte para aprender e me desenvolver. Com vocês tudo o que tenho produzido na vida é melhor. Obrigada por todo o carinho, apoio e amor verdadeiro.

A minha irmã, pela amizade, paciência e risadas. Obrigada por ser parte de mim.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Principalmente as minhas amigas Maria Thereza Nonato de Paula, Luana Moraes Oliveira e Juliana Nogueira Monteiro, muito obrigada pelo companheirismo, pelas risadas e por fazer dos meus dias, dias melhores. Vocês foram essenciais nessa etapa e serei sempre grata pela amizade!

Aos meus amigos da sala do Lique, principalmente a Monique Oliveira, Felipe Boca e Matheus Ferraciolli por me ensinarem tanto e pela amizade. Obrigada por me inspirarem a ser sempre melhor e nunca desistir.

Ao Professor Luiz Henrique Rodrigues, pela amizade e por ser uma constante fonte de motivação e incentivo. Obrigada por ter contribuído tanto com a minha formação ao longo dos anos de graduação.

À Professora Gleyce Figueiredo, por acreditar em mim, pelos ensinamentos e atenção durante a execução do trabalho. Obrigada pela orientação.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Faculdade de Engenharia Agrícola e à Unicamp pela infraestrutura da qual eu dispus.



“Esforça-te e tem bom ânimo” (1Cr 28:20)



RESUMO

Sistemas integrados entre lavoura e pecuária são de grande interesse para a intensificação da agricultura sustentável, porém ainda não foi possível avaliar com precisão todos os seus benefícios, assim, o monitoramento dessas áreas torna-se importante. Dentre as diversas variáveis de monitoramento está a umidade do solo, que é de grande importância devido principalmente ao seu papel ambiental. Dados de umidade são frequentemente obtidos em campo, porém a aquisição desses dados pode ser demorada e sujeita à falha humana. O uso do chamado método do triângulo ou do trapézio, que correlaciona índices de vegetação com a temperatura de superfície, é uma alternativa que se mostra promissora na estimativa da umidade do solo em áreas extensas, devido a sensibilidade da temperatura de superfície terrestre às variações de umidade solo. O objetivo deste trabalho foi estimar a umidade do solo em uma área de integração lavoura-pecuária pelo Método do Triângulo Simplificado. Para isso, foram utilizadas séries temporais de índice de vegetação e de temperatura de superfície do satélite LANDSAT 8 OLI/TIRS. As imagens foram processadas na plataforma *Google Earth Engine*, onde também foram calculadas a fração de cobertura vegetal (F_r) e a temperatura radiante (T^*). Em seguida, a F_r e a T^* foram *plotadas* em um gráfico de dispersão e à forma triangular foi verificada. A disponibilidade de umidade calculada pelo método do triângulo simplificado foi comparada com os dados de umidade obtidos em campo. Para avaliar a capacidade do método do triângulo em estimar a umidade do solo foram utilizados o índice de concordância de Willmott (d) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE). No geral os valores do índice “ d ” oscilaram entre 0,61 e 0,99, já os valores de RMSE entre 0 e 17% sendo estes considerados com boa concordância com os valores medidos em campo. O método apresenta-se como uma ferramenta importante para a compreensão do comportamento da umidade de forma espacial e contínua, além da identificação do manejo ao decorrer dos meses.

Palavras-chave: Temperatura de Superfície Terrestre, Integração Lavoura-Pecuária (iLP), NDVI, Manejo de Pastagem, Soja.



ABSTRACT

Integrated crop-livestock systems are of great interest for intensification of sustainable agriculture, but it has not been possible to accurately assess all their benefits. Thus, monitoring these areas becomes important. Among the monitoring variables soil moisture is of great importance mainly due to its environmental role. Soil moisture data is often obtained *in situ*, but the data acquisition can be time consuming and subject to human error. The use of the so called triangle or trapezium method, which correlates vegetation indices with land surface temperature, is a promising alternative for estimating soil moisture in large areas due to surface temperature sensitivity to soil moisture variations. The objective of this work was to estimate soil moisture in a crop-livestock integration area by the Simplified Triangle Method. For this, we used vegetation index and land surface temperature time series from LANDSAT 8 OLI/TIRS satellite. The images were processed on Google Earth Engine platform, where the vegetation cover fraction (Fr) and radiant temperature (T^*) were also calculated. Then, Fr and T^* were plotted on a scatter plot and the triangular shape was verified. The availability of soil moisture calculated by the simplified triangle method was compared with the soil moisture data obtained in the field. To assess the ability of the triangle method to estimate soil moisture, the Willmott agreement index (d) and root mean square error (RMSE) were used. In general, the “ d ” index values ranged from 0.61 to 0.99, while RMSE values ranged from 0 to 17%, which are considered to be in good agreement with the values measured in the field. The method is an important tool for understanding the behavior of soil moisture in a spatial and continuous manner, besides identifying the management over the months.

Key words: Land Surface Temperature, Intregated Crop-Livestock (iCL), NDVI, Pasture Management, Soybean.



LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema gráfico de dispersão dos valores de pixels do Índice de vegetação (valores de NDVI) em função da Temperatura de Superfície de uma imagem de satélite. Fonte: Petropoulos et al. (2009). Adaptado de Saavedra (2016).....24
- Figura 2.** Esquema gráfico do Método do Triângulo Simplificado. NDVI em função da Temperatura Radiante (T^*) de uma imagem de satélite, assumindo $EF=1$. As letras “a” e “d” representam uma parte do segmento e todo seu comprimento, respectivamente. Fonte: Adaptado de Carlson e Petropoulos (2019).....27
- Figura 3.** Localização da área de estudo com os respectivos talhões T1, T2, T3 e T4.....28
- Figura 4.** Precipitação mensal em mm na área de estudos para o ano de 2019.....29
- Figura 5.** Classificação da textura do solo segundo a USDA (*United States Department of Agriculture*). (a) Textura franco arenosa (*sandy loam*), referente ao talhão 1. (b) Textura areia franca (*loamy fine sand*), referente aos talhões 2, 3 e 4. Fonte: USDA (1987).....30
- Figura 6.** Método do Triângulo simplificado. Modelo correspondente à disponibilidade de umidade na superfície do solo. Fonte: Adaptado de Carlson e Petropoulos (2019).....34
- Figura 7.** Preparação dos dados para as avaliações. Pontos amostrais coletados em campo (a). Buffer de 40m realizado sobre os pontos amostrais coletados em campo (b). Centroides de cada pixel da imagem de satélite (c). Aplicação do buffer na imagem de satélite (d).....35
- Figura 8.** Fluxograma metodológico.....37

Figura 9. Gráfico de dispersão gerado pelo método do triângulo para os meses de dezembro de 2018 (201812), janeiro de 2019 (201901), março de 2019 (201903), abril de 2019 (201904), junho de 2019 (201906), julho de 2019 (201907) e agosto de 2019 (201908).....	38
Figura 10. Gráfico de dispersão gerado pelo método do triângulo para cada talhão, nos meses de dezembro de 2018 (201812), janeiro de 2019 (201901), março de 2019 (201903), abril de 2019 (201904), junho de 2019 (201906), julho de 2019 (201907) e agosto de 2019 (201908).....	40
Figura 11. Estimativa da Mo obtida pelo método do triângulo simplificado para os meses de março (201903) (a), junho (201906) (b), julho (201907) (c) e agosto (201908) (d).....	43
Figura 12. Índice de concordância de Wilmott para os meses de março, junho, julho e agosto de 2019, para cada ponto amostral de solo (ID).....	44
Figura 13. RMSE obtido para os meses de março (201903), junho (201906), julho (201607) e agosto de 2019 (201908), para cada ponto amostral de solo (ID).....	45



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Datas de coleta de solo para determinação da umidade do solo.....	31
Tabela 2. Data de aquisição das imagens do LANDSAT 8 OLI/TIRS.....	32
Tabela 3. Valores adotados para a capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) no cálculo da umidade, baseados em Pereira et al. (2010).....	35
Tabela 4. Período de entrada e saída do gado, assim como a quantidade de animais para cada período e a quantidade de animais por hectare (n° animais /ha).....	41
Tabela 5. Valores de RMSE e índice d, em função dos talhões para os meses de Março (201903), junho (201906), julho (201907) e agosto (201908).....	46

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2.	OBJETIVOS.....	18
1.2.1.	Objetivo Geral	18
1.2.2.	Objetivo Específicos.....	18
2.	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1.	Integração lavoura-pecuária.....	18
2.2.	Sensoriamento remoto	19
2.3.	Satélite LANDSAT 8	20
2.4.	Índices de vegetação	21
2.5.	Séries temporais	22
2.6.	Umidade.....	22
2.7.	Método do Triângulo	23
2.7.1.	Propriedades do Método do Triângulo	25
2.7.2.	Método do Triângulo Simplificado	26
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1.	Área de estudo.....	28
3.2.	Obtenção da umidade no campo	30
3.3.	Aquisição das imagens	31
3.4.	Aplicação do Método do Triângulo Simplificado.....	32
3.4.1.	Estimativa da umidade	33
3.5.	Preparação dos dados para as avaliações	35
3.6.	Métricas de avaliação	36
3.7.	Fluxograma metodológico	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37

4.1.	Método do triângulo	37
4.2.	Umidade.....	42
5.	CONCLUSÃO	47
6.	REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

Sistemas integrados entre lavoura, pecuária e floresta contemplam os sistemas de integração lavoura-pecuária, silviagrícolas, silvipastoris e agrossilvipastoris (BALBINO et al., 2011), são praticados há anos, de forma plena ou eventual, em muitos países, principalmente os desenvolvidos ou em desenvolvimento (HERRERO et al., 2013). Muitas vezes, em situações de conflito por interesses divergentes, relacionados a crescente demanda por alimentos e energia, preços de insumos e produtos, além do desenvolvimento socioeconômico, sustentabilidade dos recursos naturais, necessidade de redução do desmatamento e mitigação dos impactos climáticos gerados pela agricultura (HAVLÍK et al., 2014).

De grande interesse para a intensificação da agricultura sustentável, os sistemas integrados de produção agrícola conseguem o sinergismo na interação solo-planta-animal-atmosfera (BALBINO et al., 2012), sendo assim são mais sustentáveis do que aqueles especializados somente na produção de grãos (WILKINS, 2008) ou na produção de carne bovina.

A substituição de sistemas especializados de produção, por sistemas de integração lavoura-pecuária, gera impactos diversos no manejo global da propriedade e no meio ambiente. Dentre os impactos negativos encontrados pelo sistema lavoura-pecuária, o mais frequentemente citado é o resultante do pisoteio animal, que pode criar um incremento na resistência à penetração e na densidade do solo (MARCHÃO et al., 2007). Contudo, apesar de significativos, os impactos devido ao pisoteio animal no solo limitam-se às camadas superficiais e podem ser temporários e reversíveis (CORSI et al., 2001; CASSOL, 2003; LANZANOVA et al., 2007).

Em contrapartida, existem benefícios do ponto de vista das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como a quebra do ciclo de pragas e doenças, aumento da atividade biológica do solo, melhoria na fertilidade, pela ciclagem dos nutrientes e eficiência no uso de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação (VILELA et al., 2011), além de benefícios com relação ao estoque de carbono (SALTON, 2005) e a contribuição para o aumento do armazenamento de água no solo,

principalmente quando associados ao sistema plantio direto (MARCHÃO et al., 2007).

Embora haja muitas vantagens, que tornam o sistema integrado de lavoura-pecuária de interesse nacional e mundial (HERRERO et al., 2010), a quantificação com precisão de todos os pontos positivos e negativos trazidos pela implementação do sistema, se torna complexa, devido principalmente a uma escassez de dados disponíveis para avaliar as métricas de sustentabilidade. Isso ocorre devido a dinâmica do ambiente que resulta da sucessão de diferentes usos da terra. Assim, faz-se necessário a caracterização e monitoramento desses sistemas, visando explicar a variabilidade do mesmo, espacialmente e temporalmente (HERRERO et al., 2010).

Esse monitoramento pode ser realizado por meio da integração de diferentes técnicas, entre elas o sensoriamento remoto para identificação e monitoramento da área e modelos biogeoquímicos para quantificação de fluxo de gases. Série de imagens com alta frequência temporal mostraram ser a melhor alternativa para mapear alvos com alta variação ao longo dos ciclos fenológicos, tais como culturas anuais e pastagens. Já os modelos biogeoquímicos podem medir a ciclagem de gases, por exemplo, carbono ou Nitrogênio nesse sistema.

Dentre as diversas variáveis de entrada dos modelos biogeoquímicos está a umidade do solo. O conhecimento da umidade do solo é de grande importância devido ao papel ambiental relacionado a processos biológicos, ecológicos, hidrológicos e atmosféricos (ZHAN et al., 2004; ÁVILA et al., 2010).

A umidade do solo pode ser medida em campo por meio da coleta, pesagem, secagem e pesagem novamente do material coletado, porém, esse tipo de medida pode ser demorada e pode estar sujeita a falha. Além disso, quando é necessário fazer a espacialização dos dados do modelo biogeoquímico torna-se difícil obter dados espaciais de umidade do solo por meio desses métodos convencionais. A utilização de imagens de satélite de temperatura de superfície, pode ser útil na estimativa espacial e temporal da umidade do solo (ZHAN et al., 2004), isso devido ao fato da temperatura de superfície ser a variável obtida por imagem que mais se relaciona com a

umidade, já que quanto maior a temperatura de superfície menor será a umidade (PETROPOULOS, 2009).

A estimativa da umidade do solo mediante dados de imagens ópticas de satélite, pode ser feita utilizando o espectro visível, micro-ondas ou combinando informações de temperatura de superfície da terra por meio do infravermelho termal (VIVONI et al., 2008; BAUP et al., 2007; DAS e MOHANTY, 2008; KATRA et al., 2007, ZENG et al., 2004).

Alguns estudos correlacionam a temperatura de superfície com a umidade por meio de modelagem com algoritmos (SUN e PINKER, 2004), outros estudos constroem relações empíricas entre a temperatura de superfície e os índices de vegetação (GILLIES et al., 1997; NAGLER et al., 2005; TANG et al., 2010). Um desses índices é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse et al. (1973).

Os métodos que correlacionam índices de vegetação com a temperatura de superfície são frequentemente chamados de “método do triângulo” (CARLSON, 2007). A abordagem do método é baseada em uma interpretação contextual de um gráfico de dispersão derivado da relação entre temperatura de superfície (*Land Surface Temperature* - LST) e os índices de vegetação.

O método do triângulo até o momento foi utilizado em pesquisas desenvolvidas juntamente com modelos complexos (CARLSON e SANCHEZ-AZOFEIFA, 1999). Segundo Carlson (2013), a utilização desses modelos matemáticos complexos tem se demonstrado desnecessários, pois o cálculo pode ser realizado de maneira simples, com apenas algumas variáveis de maior importância. O cálculo simplificado considerando apenas as variáveis físicas de maior importância, puramente geométrica, tornam sua aplicação mais prática. Essa simplificação do modelo é intitulada de Método do Triângulo Simplificado (CARLSON, 2013).

1.1. JUSTIFICATIVA

O conhecimento da umidade do solo é de grande importância devido ao papel ambiental relacionado a processos biológicos, ecológicos, hidrológicos e atmosféricos (ZHAN et al., 2004; ÁVILA et al., 2010).

Dados de umidade são frequentemente obtidos em campo, por meio de instrumentos terrestres e geralmente são mais acurados, porém sua implementação pode ser demorada e sujeita à falha do instrumento, além disso, possuem uma forte limitação espacial devido à grande variabilidade da umidade no solo, assim estudos em grandes áreas não são capazes de fornecer estimativas do conteúdo de umidade do solo por meio desses instrumentos (PETROPOULOS et al., 2009).

Diversos modelos biogeoquímicos fazem uso da umidade do solo como um dos parâmetros para medidas de fluxo de energia entre solo-planta-atmosfera. No entanto, o processo em se obter esses dados de forma espacial e contínua não é de fácil acesso. As estimativas da umidade do solo baseadas em sensoriamento remoto, geralmente oferecem sérias limitações quanto à sua representatividade em camadas mais profundas, porém, apresentam maior abrangência espacial e temporal (DE JEU et al., 2008).

O uso do chamado método do triângulo ou do trapézio, que correlaciona índices de vegetação com a temperatura de superfície terrestre, é baseado em uma interpretação contextual de um gráfico de dispersão derivado da relação entre temperatura de superfície e índice de vegetação. Alguns estudos como os de Carlson e Gillies (1995), Gillies et al. (1997), Sun et al. (2004), Lopes et al. (2011), utilizaram diferentes conjuntos de dados espaciais para demonstrar que os limites da forma triangular pode ser usada para inferir as limitações físicas para a solução dos fluxos de energia de superfície e a disponibilidade da umidade do solo.

O surgimento da forma triangular é o resultado da sensibilidade da temperatura de superfície terrestre às variações de umidade do solo, demonstrando-se como uma alternativa promissora na estimativa da umidade do solo (YANG et al., 2015).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi estimar umidade do solo em áreas com sistema de integração lavoura-pecuária pelo Método do Triângulo Simplificado.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Identificar os diferentes manejos da área pelo método do triângulo;
- Determinar a umidade do solo;
- Gerar mapas de umidade do solo na área de estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Integração lavoura-pecuária

Os sistemas agropastoris, que integram atividades agrícolas e pecuárias, são considerados, inovadores no Brasil, embora vários tipos de plantios associados entre culturas anuais e culturas perenes ou entre culturas e pastagem sejam conhecidos na Europa desde a antiguidade (BALBINO, et al., 2011).

O desaparecimento desses sistemas se deu quando o aumento da demanda por alimentos e a evolução tecnológica na produção iniciaram a atividade agrícola moderna. A atividade agrícola moderna caracterizou-se por sistemas padronizados, em que a agricultura e a pecuária passaram a ter gestões separadas (GHOLZ, 1987).

Na pecuária a gestão unicamente do gado leva a degradação das pastagens que comprometem a sustentabilidade da produção animal, e pode ser explicada como um processo dinâmico de degeneração ou de queda relativa da produtividade (MACEDO, 2001). Dentre os fatores mais importantes relacionados com a degradação das pastagens destacam-se o manejo animal inadequado e a falta de reposição de nutrientes.

Segundo estudos apresentados por Macedo (2009), Balbino (2011) e Hernani et al. (2002), o monocultivo e as práticas culturais inadequadas, sem a utilização de boas práticas agrônômicas, têm causado perda de

produtividade, ocorrência de pragas e doenças, aumento da erosão, e degradação do solo e dos recursos naturais.

A integração lavoura-pecuária permite a intensificação e o aumento da eficiência do uso da terra, gerando melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, contribuindo para aumentar a produtividade do sistema (COSTA e RAVA, 2003; VILELA et al., 2003), diminuindo inclusive as taxas de emissão de gases do efeito estufa por unidade de alimento produzido, para sistemas de integração com manejo eficiente (GUO e GIFFORD, 2002).

Em regiões onde a produção agrícola e a preservação dos recursos naturais estão sob crescente pressão, devido a degradação das pastagens, grandes extensões de área com monocultivo da soja, dívidas financeiras, preços de insumos e produtos e grande competição global, sistemas eficientes são cada vez mais demandados (MACEDO, 2009). O sistema de integração lavoura pecuária tende a oferecer a implementação de práticas que promovam o bom uso da terra, como uma alternativa às questões ecológicas, econômicas e sociais (BALBINO e DI STEFANO, 1999; BALBINO et al., 2002).

2.2. Sensoriamento remoto

O mapeamento de áreas com grandes extensões demanda considerável quantidade de esforços, principalmente quando se pretende captar a variabilidade do terreno, sendo o sensoriamento remoto (SR) uma das principais técnicas utilizadas nesse processo (MARQUES et al., 2009).

A fundamentação das técnicas de SR é baseada na interação da energia eletromagnética com a matéria que constitui os fenômenos da superfície terrestre (ARCO et al., 2003). Esta interação é dependente da estrutura atômica e molecular de cada alvo, o que influencia a quantidade de energia refletida, absorvida, transmitida e emitida pelos fenômenos em certos comprimentos de onda do espectro eletromagnético (FIGUEIREDO, 2005).

Os diferentes tipos de interação da energia com a matéria, geram curvas características, essas curvas são chamadas de assinatura espectral. Sua obtenção se dá por meio dos sensores remotos embarcados em satélites,

que são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre (MORAES, 2002).

Uma das formas de armazenar essas informações é por meio de imagens espectrais, também conhecidas como imagens de satélite, a interpretação da mesma é realizada por meio da composição colorida de duas ou três bandas espectrais, a qual revela diversas informações sobre o reconhecimento dos atributos do terreno. A melhor combinação das bandas pode variar de acordo com o objetivo do levantamento, tipo de alvo e época de obtenção da imagem (LUIZ et al., 2002).

2.3. Satélite LANDSAT 8

O satélite Landsat-8 é o mais recente de sua série. Foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 pela NASA, opera a uma altitude de 705 km, numa órbita heliossíncrona com inclinação de 98,2° (ligeiramente retrógrada) (USGS, 2018).

A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores, sendo o primeiro, *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a banda pancromática, apresentando as seguintes características:

- Banda 1 - Visível Ultra-Azul (0,43 - 0,45 μm) 30 m
- Banda 2 - Visível Azul (0,45 - 0,51 μm) 30 m
- Banda 3 - Visível Verde (0,53 - 0,59 μm) 30 m
- Banda 4 - Visível Vermelho (0,64 - 0,67 μm) 30 m
- Banda 5 - Infravermelho Próximo (0,85 - 0,88 μm) 30 m
- Banda 6 - Infravermelho Médio/SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm) 30 m
- Banda 7 - Infravermelho Médio/SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m
- Banda 8 - Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m
- Banda 9 - Cirrus (1,36 - 1,38 μm) 30 m

O outro sistema imageador é o *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS) com duas bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em 30

metros, para coincidir com a maioria das bandas multiespectrais do sistema imageador OLI (USGS, 2018).

- Banda 10 - Infravermelho Termal/TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm) 100 m - tratada e disponibilizada com pixel de 30 metros.
- Banda 11 - Infravermelho Termal/TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm) 100 m - tratada e disponibilizada com pixel de 30 metros.

A resolução radiométrica é de 16 Bits, Datum WGS 1984, projeção UTM.

2.4. Índices de vegetação

Várias técnicas de processamento de imagens são utilizadas para estabelecer melhor relação entre os parâmetros biofísicos da vegetação e os parâmetros radiométricos contidos em produtos de sensoriamento remoto (PONZONI, 2001). O contraste entre imagens de satélite pode ser explorado de forma a gerar novas imagens que indiquem comportamentos distintos entre solo exposto (absorção) e vegetação (reflectância), dentre as técnicas existentes destaca-se os índices de vegetação (HUETE, 1988).

Os índices de vegetação são transformações matemáticas da reflectância com o propósito de se explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (WIEGAND et al., 1991).

Um desses índices é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) (ROUSE, et. al., 1973), obtido com base na razão entre a subtração e a soma das reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho do espectro eletromagnético, representado pela equação 1.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}} \text{ (equação 1)}$$

Em que IVP e V representam a reflectância nas bandas do infravermelho próximo (Banda 5) e do vermelho (Banda 4), respectivamente (ROUSE, et. al., 1973).

Os valores de NDVI variam de -1 a 1. Lillesand e Kiefer (1999) observaram que os valores de NDVI tendem a 1 para vegetações densas,

como florestas bem desenvolvidas, pois refletem pouca radiação na banda do vermelho e muita radiação na banda do infravermelho, já os valores que tendem a 0 foram observados para regiões de solo exposto, como aqueles encontrados em áreas após a colheita.

O NDVI é muito utilizado para o monitoramento da vegetação, construindo-se os perfis sazonal e temporal do seu comportamento, o que permite comparações interanuais entre esses perfis, possibilitando assim, detectar atividades sazonais e fenológicas de culturas, além da duração do período de crescimento, mudanças fisiológicas e períodos de senescência (SHIMABUKURO, 2007).

2.5. Séries temporais

Dados de SR são amplamente utilizados para o mapeamento da atividade agrícola (ATZBERGER, 2013; FORMAGGIO e SANCHES, 2017), contudo a utilização de uma única imagem, de determinada data, pode não fornecer informações espectrais suficientes sobre a área plantada ou indicações sobre o crescimento e desenvolvimento de culturas (SANCHES et al., 2005),

Segundo estudos realizados por Kastens et al. (2005); Jakubauskas et al. (2002) e Wardlow et al. (2007), a utilização de séries multi-temporais de imagens de satélites tem demonstrado um grande potencial no monitoramento e mapeamento do comportamento das culturas agrícolas ao longo de seu desenvolvimento, além disso possibilita comparar diferentes comportamentos ao longo dos anos.

Dessa forma, para o acompanhamento de diversos alvos na superfície terrestre, principalmente aqueles com grande dinâmica espectro-temporal, como no caso das culturas agrícolas, é imprescindível uma análise multi-temporal (HOLBEN, 1986).

2.6. Umidade

A umidade do solo é uma variável chave na regulação de vários processos e ciclos do sistema climático, tais como os fluxos de energia e os

ciclos biogeoquímicos (RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1991; TEULING et al., 2009; SENEVIRATNE et al., 2010).

De acordo com Zhan et al. (2004), variações na umidade do solo produzem mudanças significativas no balanço da energia da superfície. Em virtude da marcante influência no armazenamento de energia térmica a umidade do solo tem grande efeito na magnitude da temperatura da superfície. Quanto menor quantidade de energia total utilizada pelo fluxo de calor latente, mais energia estará disponível para o aquecimento sensível, induzindo um aumento da temperatura do ar próximo à superfície (KOSTER et al, 2006).

Diversos pesquisadores vêm utilizando dados espectrais terrestres e orbitais para determinação espacial da umidade do solo. Hassan et al. (2007) obtiveram forte correlação (i.e., $r^2=0.957$) entre as estimativas baseadas em índices de vegetação usando dados do satélite MODIS em comparação com medidas da umidade volumétrica do solo.

No que se refere às medições no campo, os métodos existentes são pontuais, sendo difícil a extrapolação para outras escalas, além disso, possuem uma forte limitação espacial devido à grande variabilidade da umidade no solo (PETROPOULOS et al., 2009). Em vista disso, as medidas por sensoriamento remoto têm sido consideradas promissoras, entretanto, elas também apresentam suas limitações, dentre as quais se destacam a resolução espacial, a interferência da vegetação e a possibilidade de capturar a variação da umidade do solo apenas nos poucos centímetros superficiais do solo (DE JEU et al., 2008).

2.7. Método do Triângulo

Para determinação dos fluxos de energia na superfície da terra, foram desenvolvidas diferentes metodologias que utilizam como dados de entrada aqueles obtidos remotamente. Dentre os dados obtidos remotamente, os utilizados na metodologia denominada método do triângulo ou do trapézio são as frações de cobertura obtida por meio de índices de vegetação associados à temperatura da superfície terrestre (CARLSON et al., 1994; CARLSON et al., 1995; GILLIES et al., 1997; PETROPOULOS et al., 2009).

A combinação dessas duas variáveis se dá por meio de um gráfico de dispersão bidimensional que origina uma nuvem de pontos com forma geométrica similar a um triângulo e eventualmente um trapézio, sobre o qual são inferidas estimativas da evapotranspiração e da umidade do solo (CARLSON, 2007).

Petropoulos et al. (2009) fizeram a descrição geral das principais metodologias desenvolvidas para estimar fluxos de calor latente, evapotranspiração e disponibilidade de umidade no solo e desenharam o espaço gráfico de dispersão dos valores de pixels de NDVI em função da Temperatura de Superfície de uma imagem de satélite, incluindo os limites físicos envolvidos nesta metodologia como apresentado na Figura 1.

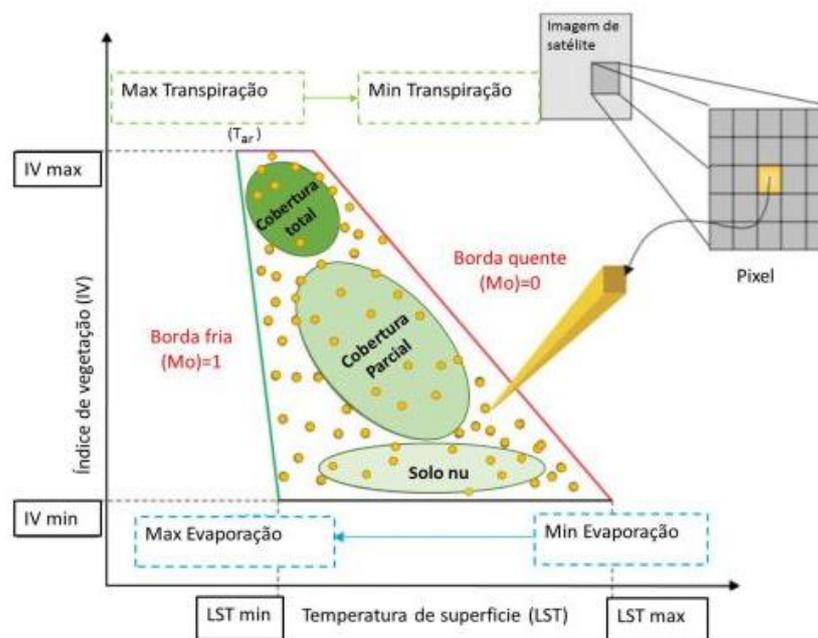


Figura 1. Esquema gráfico de dispersão dos valores de pixels do Índice de vegetação (valores de NDVI) em função da Temperatura de Superfície de uma imagem de satélite. Fonte: Petropoulos et al. (2009). Adaptado de Saavedra (2016).

Segundo Carlson (2007) as bordas desse triângulo (ou trapézio), refletem limites físicos reais, sendo as áreas completamente secas ou com umidade do solo limitada, com maior temperatura, correspondente à borda da direita (Figura 1). Da mesma forma, áreas mais úmidas com conteúdo máximo de água no solo correspondem à borda da esquerda. Variações ao longo do

eixo do índice de vegetação refletem os efeitos combinados de umidade do solo e variações topográficas entre as áreas de solo exposto (menores valores do índice de vegetação) e a cobertura vegetal total (expressa pelo valor mais alto de índices de vegetação).

A forma geométrica de um triângulo surge porque o intervalo de temperatura de superfície diminui à medida que a densidade de vegetação (valor de NDVI) aumenta, formando uma faixa estreita de variação da temperatura de superfície sobre a vegetação densa. A presença de um trapézio ao invés da forma triangular é resultado da alteração do conteúdo de água no solo, representando o aumento da temperatura de superfície quando o índice de vegetação permanece no valor máximo (CARLSON, 2007; MURRAY e VERHOEF, 2007).

Os pontos distantes podem representar superfícies como água e nuvem, nesses casos, esses pontos são descartados da análise, ou atribuídos valores padrão para superfícies de solo totalmente secas ou molhadas, onde pixels estão perto das bordas secas ou molhadas (CARLSON, 2007).

2.7.1. Propriedades do Método do Triângulo

Os valores mais altos e mais baixos do Índice de Vegetação (valores do NDVI) (Figura 1), representados por NDVIs e NDVlo, pertencem a 100% de cobertura de vegetação e solo exposto, respectivamente (CARLSON e RIPLEY, 1997).

Por meio dos valores de NDVI podemos definir a cobertura vegetal fracionada (Fr), proposta por (GILLIES et al, 1997) (equação 2). Fr minimiza a necessidade de correções atmosféricas, sendo de extrema importância quando se trabalha com série de dados temporais de uma determinada região (BRUNSELL et al. 2009).

$$Fr = ((NDVI - NDVlo) / (NDVIs - NDVlo))^2 \text{ (equação 2)}$$

Em que NDVlo é o valor de NDVI correspondente ao solo nu e NDVIs é o valor de NDVI correspondente à cobertura máxima da vegetação (GILLIES et al, 1997).

Os valores da temperatura de superfície (Figura 1) são apresentados em forma de temperatura mínima (LSTmin) e temperatura máxima (LSTmax), escalado da temperatura radiante (T^*), que varia de 0 (LSTmin) para a temperatura que pertence a um grupo denso de vegetação em solos bem regados, a 1 (LSTmax) para a temperatura em solo seco ou solo nu. Define-se T^* como:

$$T^* = (LST_{ir} - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min}) \text{ (equação 3)}$$

Em que LST_{ir} é a temperatura de superfície radiante, LST_{max} é o valor da LST para solo nu, e LST_{min} é o valor correspondente de LST para cobertura máxima da vegetação (CARLSON, 2007).

Assim, T^* e a cobertura fracionária de vegetação F_r são, portanto, restritos a variar entre 0 e 1.

2.7.2. Método do Triângulo Simplificado

O método do triângulo até o momento foi utilizado em pesquisas desenvolvidas juntamente com modelos complexos (CARLSON e SANCHEZ-AZOFEIFA, 1999). Esses modelos complexos são conhecidos como SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*) e consideram solo, vegetação e atmosfera. Segundo Carlson (2013), a utilização desses modelos matemáticos complexos tem se demonstrado desnecessários, pois o cálculo pode ser realizado de maneira simples, com apenas algumas variáveis de maior importância. Essa simplificação do modelo é intitulada de Método do Triângulo Simplificado.

O “Método do Triângulo Simplificado” tem uma grande vantagem sobre os outros métodos que pertencem a esse mesmo grupo de modelos, pois não considera qualquer informação ou variáveis obtidas a partir de dados meteorológicos para a sua execução (CARLSON e PETROPOULOS, 2019), a hipótese considera que somente o uso de imagens de satélite é necessária para estimar a evapotranspiração em grandes áreas.

A geometria apresentada pelo Método assume que a relação de evapotranspiração (EF_{total}) (equação 4) e a disponibilidade de umidade superficial (M_o) (equação 5) variam linearmente.

$$EF_{total} = EF_{solo} \times (1 - Fr) + Fr_{pixel} \times EF_{veg} \quad (\text{equação 4})$$

Em que EF_{veg} é o valor da vegetação para evapotranspiração potencial (assumido pela equação o valor igual a 1).

$$Mo = 1 - T_{(pixel)}^* / T_{(borda quente)} \quad (\text{equação 5})$$

$T_{(borda quente)}$ é representada pela temperatura de superfície ao longo da borda quente, sendo que para um triângulo com um vértice superior bem definido, a inclinação da reta será sempre:

$$T_{(borda quente)} = 1 - Fr \quad (\text{equação 6})$$

Na simplificação do método do triângulo a Mo pode ser determinada pela razão entre os comprimentos “a” (parte do segmento do triângulo) e “d” (todo o comprimento do triângulo) (Figura 2), com isso a determinação da estimativa da Mo pode ser realizada por meio da equação 7.

$$Mo = 1 - T_{(pixel)}^* \quad (\text{equação 7})$$

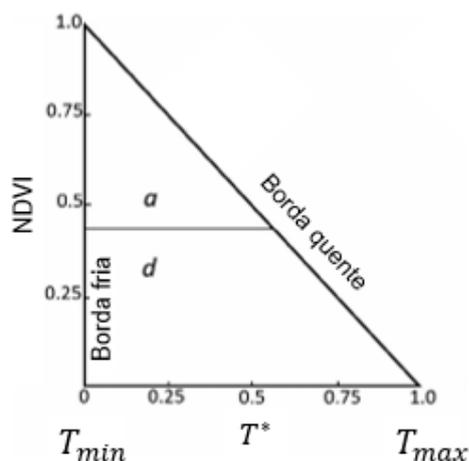


Figura 2. Esquema gráfico do Método do Triângulo Simplificado. NDVI em função da Temperatura Radiante (T^*) de uma imagem de satélite, assumindo $EF=1$. As letras “a” e “d” representam uma parte do segmento e

todo seu comprimento, respectivamente. Fonte: Adaptado de Carlson e Petropoulos (2019).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 3) localiza-se na região oeste do Estado de São Paulo, no município de Caiuá, situada na mesorregião de Presidente Prudente, correspondendo a um total de 200 hectares.

O estudo foi realizado no primeiro ano de implantação da integração lavoura-pecuária. A soja foi semeada em novembro de 2018 e colhida no final de março a início de abril de 2019. Já a pastagem foi semeada imediatamente após a colheita da soja, sendo essa pastagem um sistema de consórcio entre braquiária (*Urochloa ruziziensis*) e milheto (*Pennisetum glaucum*) e dessecada no início de novembro de 2019.

Foram coletados 40 pontos amostrais de solo (Figura 3) na camada de 0 – 0,05 m de profundidade da área de estudo, com o auxílio do trado tipo holandês e então georreferenciadas. Os pontos amostrais foram coletados de forma que a variabilidade granulométrica na área fosse representada de forma adequada.

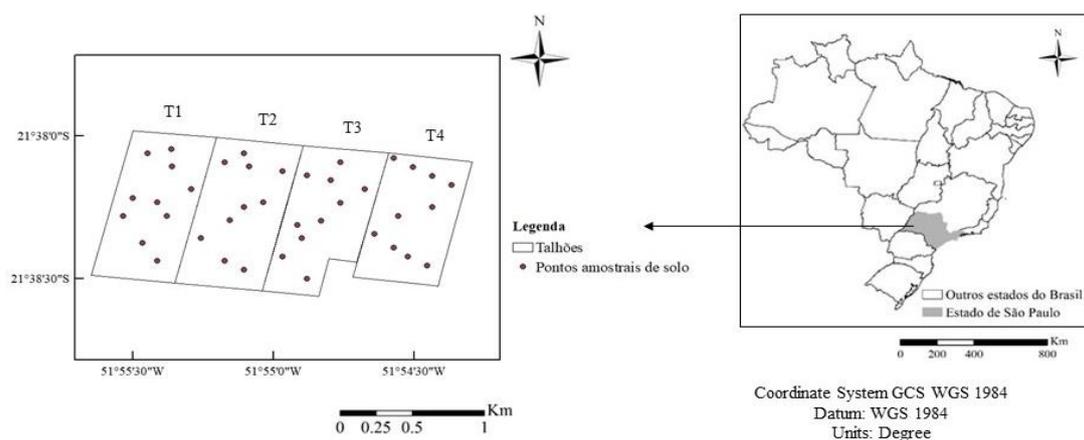


Figura 3. Localização da área de estudo com os respectivos talhões T1, T2, T3 e T4.

O clima da região é classificado como Aw (KOPPEN e GEIGER, 1928), tropical chuvoso, com inverno frio e seco, a precipitação foi obtida por meio do NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resource) (Stackhouse et al.,

2018). A média de precipitação anual varia entre 1100 e 1400 mm, com período chuvoso entre os meses de janeiro a março (Figura 4).

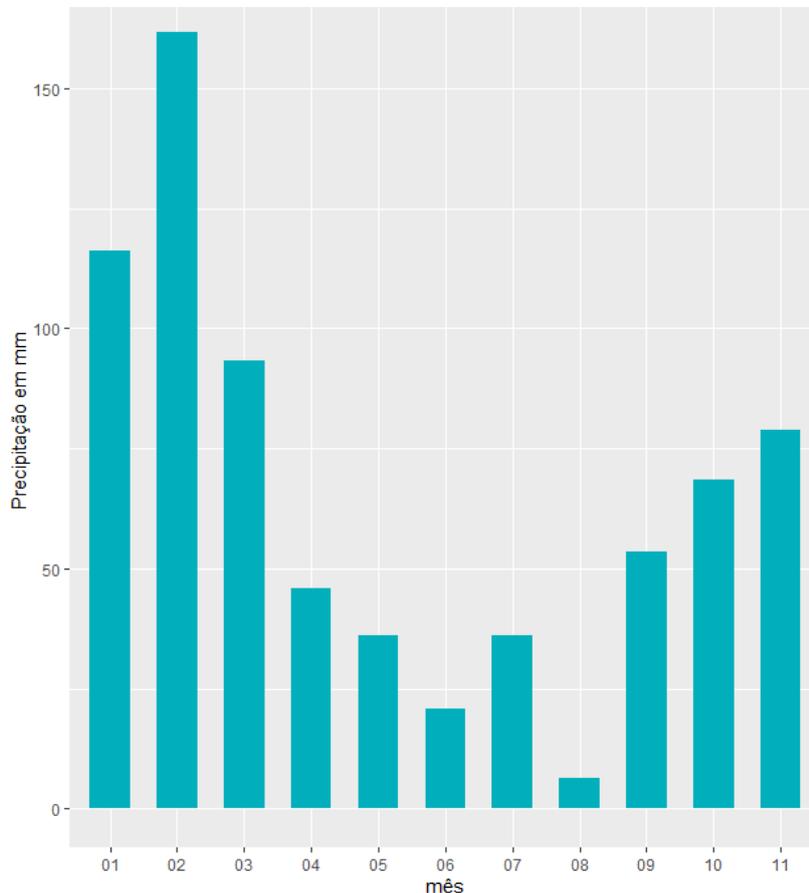


Figura 4. Precipitação mensal em mm na área de estudos para o ano de 2019.

A textura do solo na área é heterogênea, portanto, para cada talhão, adotou-se a textura predominante. Para isso calculou-se a quantidade mediana de areia, silte e argila utilizando os 40 pontos amostrais de solo e então classificou-se o solo de acordo com a *United States Department of Agriculture* (USDA, 1987) (Figura 5). No talhão 1 a textura predominante é a franco arenosa (*sand loam*), já nos talhões de 2 a 4 a predominância é da textura areia franca (*loamy fine sand*).

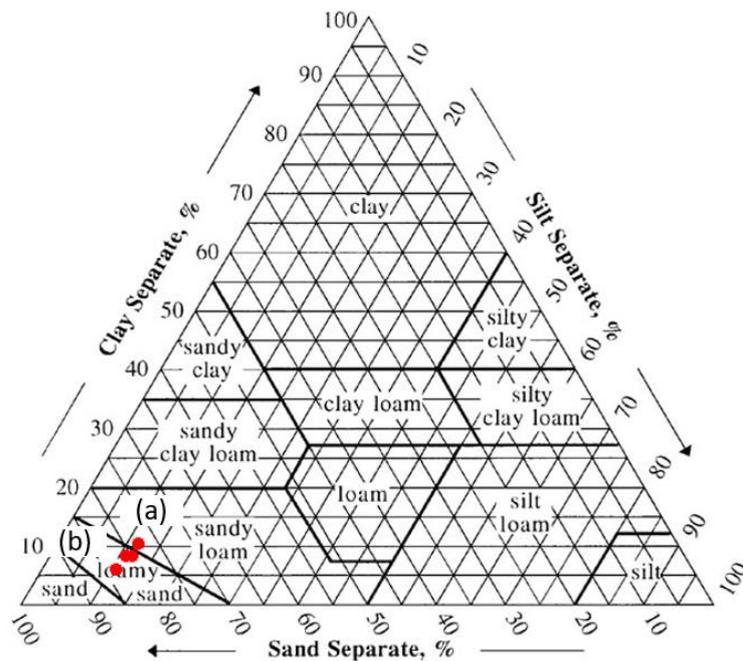


Figura 5. Classificação da textura do solo segundo a USDA (*United States Department of Agriculture*). (a) Textura franco arenosa (*sandy loam*), referente ao talhão 1. (b) Textura areia franca (*loamy fine sand*), referente aos talhões 2, 3 e 4. Fonte: USDA, 1987.

3.2. Obtenção da umidade no campo

Por meio dos 40 pontos amostrais de solo coletados a umidade foi determinada. Após a coleta de solo, as amostras foram pesadas, depois secas em estufa de circulação forçada de ar a 105°C, por um período de 48 horas e então pesadas novamente, obtendo-se assim a umidade em base de massa (U) para cada amostra de solo (equação 8).

$$U = \frac{M_a}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \text{ (equação 8)}$$

Em que:

M_a = Massa de água

M_t = Massa total

M_s = Massa de solo seco

Para a obtenção da umidade em base volumétrica (θ_v Campo) utilizou-se a equação 9.

$$\theta_v \text{ Campo} = U \cdot \rho_{\text{solo}} \cdot 100 \text{ (equação 9)}$$

Em que ρ_{solo} é a densidade do solo obtida em campo (equação 10) nos primeiros 5 centímetros para os pontos amostrais (Figura 3). A densidade do solo foi obtida por meio do método do cilindro volumétrico, em que se obteve a massa do solo (M_s) por pesagem e o volume pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada por meio de um cilindro de volume interno conhecido (V).

$$\rho_{solo} = M_s / V \text{ (equação 10)}$$

As datas correspondentes as coletas de solo podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1. Datas de coleta de solo para determinação da umidade do solo.

Mês	Data de coleta
Março	21/03/2019
Junho	16/06/2019
Julho	17/07/2019
Agosto	10/08/2019

3.3. Aquisição das imagens

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 dos sensores OLI e TIRS com correção de reflectância de superfície no período de outubro de 2018 a setembro de 2019, correspondentes à órbita ponto 223/75. Essas imagens possuem 30 metros de resolução espacial e 16 dias de resolução temporal. Todos os processamentos foram desenvolvidos na plataforma Google Earth Engine - GEE (GORELICK et al, 2017).

Ao total sete imagens foram adquiridas no período selecionado devido a indisponibilidade de algumas imagens em alguns meses, ou a constatação da presença de nuvens. Os meses de aquisição foram: dezembro de 2018, janeiro de 2019, março de 2019, abril de 2019, junho de 2019, julho de 2019 e agosto de 2019 (Tabela 2)

Tabela 2. Data de aquisição das imagens do LANDSAT 8 OLI/TIRS.

Mês	Data de coleta
Dezembro	16/12/2018
Janeiro	01/01/2019
Março	06/03/2019
Abril	23/04/2019
Junho	10/06/2019
Julho	12/07/2019
Agosto	13/08/2019

3.4. Aplicação do Método do Triângulo Simplificado

Após a aquisição das imagens corrigidas foi possível a realização dos subprodutos NDVI (equação 1) e LST.

Para a realização do LST os produtos da Banda 10 foram convertidos para radiância, utilizando os parâmetros fixos de conversão de níveis de cinza da imagem (NC) (equação 11), depois para temperatura em Kelvin (equação 12), fundamentado nas equações e valores presentes propostos pelo USGS (2018).

$$\rho\lambda = M_p \times Q_{cal} + A_p \text{ (equação 11)}$$

Em que:

$\rho\lambda$ = Radiância espectral ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$).

M_p = Fator multiplicativo de rendimento da banda (REFLECTANCEW_MULT_BAND_n - arquivo metadata).

Q_{cal} = Valor quantizado calibrado em nível de cinza.

A_p = Fator aditivo de redimensionamento da banda (REFLECTANCE_ADD_BAND_N - arquivo metadata).

$$LST_{ir} (K) = K_2 / \ln\left(\frac{K_1}{\rho\lambda} + 1\right) \text{ (equação 12)}$$

Em que:

$LST_{ir}(K)$ = Temperatura (Kelvin).

$K1 =$ Constante de calibração 1 ($W/m^2 sr \mu m$)
($K1_CONSTANT_BAND_x$, onde x é o número da banda termal).

$K2 =$ Constante de calibração 2 (Kelvin) ($K2_CONSTANT_BAND_x$, onde x é o número da banda termal).

$\rho\lambda =$ Radiância espectral ($W/m^2 sr \mu m$).

As constantes térmicas da banda 10 do Landsat 8 foram obtidas no arquivo de metadados. Convertem-se os valores de temperatura em Kelvin para valores em graus Celsius ($^{\circ}C$), conforme equação a seguir:

$$LST_{ir} (^{\circ}C) = LST_{ir}(K) - 273.15 \text{ (equação 13)}$$

Após o cálculo do NDVI e LST foram extraídos das imagens os valores de NDVIs e NDVIo, LSTmax e LSTmin respectivamente.

Os maiores valores de NDVI, que definem o NDVIs, foram obtidos a partir de pixels que possuem densa cobertura vegetal (ou seja, 100% de cobertura), enquanto os valores NDVIo foram os menores valores de NDVI, obtidos de pixels com solo nu.

Os valores de LSTmax foram obtidos para pixels com solo seco e nu e LSTmin para áreas com vegetação densa ou solos úmidos, como proposto por Carlson (2007).

Assim, calculou-se a cobertura vegetal fracionada (Fr) (equação 2) e a Temperatura radiante (T^*) (equação 3).

Os valores de Fr foram plotados em relação a T^* na forma de gráficos de dispersão para cada imagem da área de estudo de forma a mostrarem o arranjo triangular dos pixels, a partir do qual o método triangular é nomeado.

3.4.1. Estimativa da umidade

A Mo foi determinada a partir de soluções geométricas simples exemplificadas em Carlson (2013), seguindo a equação 7.

Na Figura 6 a disponibilidade de umidade na superfície do solo é representada pelas linhas sólidas, rotuladas abaixo da base do triângulo. A linha inclinada correspondente a $Mo = 0$ e é a chamada borda quente, já a vertical onde $Mo = 1$ é a chamada borda fria.

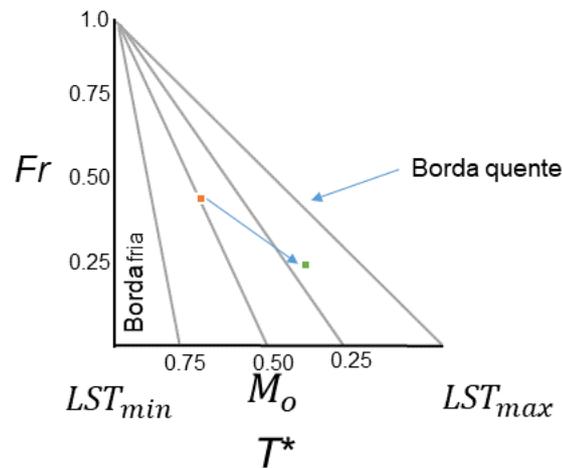


Figura 6. Método do Triângulo simplificado. Modelo correspondente à disponibilidade de umidade na superfície do solo. Fonte: Adaptado de Carlson e Petropoulos (2019).

Para a estimativa da umidade do solo em base volumétrica (θ_v), utilizou-se a relação proposta por Wagner, et al. (1999) (equação 14).

$$\theta_v = \theta_{min} + M_o (\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (\text{equação 14})$$

Em que θ_{max} é o limite superior de θ_v e pode assumir valores entre a capacidade de campo (θ_{cc}) e o teor de umidade saturada. Na maioria dos casos, exceto imediatamente após um evento de forte chuva ou irrigação, o θ_{max} pode ser definido como a θ_{cc} . O θ_{min} é o limite inferior de θ_v e pode ser representado como o ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). Esses limites são específicos em cada solo.

Adotou-se os valores médios ao intervalo recomendado por Pereira et al. (2010), para a capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) de acordo com o tipo de solo para cada talhão (Tabela 3).

Tabela 3. Valores adotados para a capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) no cálculo da umidade, baseados em Pereira et al. (2010).

Talhão	Textura do solo	θ_{cc} (m ³ /m ³)	θ_{pmp} (m ³ /m ³)
T1	Franco arenoso	0,215	0,095
T2	Areia franca	0,155	0,075
T3	Areia franca	0,155	0,075
T4	Areia franca	0,155	0,075

3.5. Preparação dos dados para as avaliações

A fim de comparar a umidade obtida em campo (Figura 7a) e a estimada por meio do método do triângulo (Figura 7c), foi necessária a realização da seleção dos pixels da imagem mais próximos dos pontos amostrais de solo. Para isso realizou-se um *buffer* de 40 metros em cada ponto amostral coletado em campo (Figura 7b), esse *buffer* foi aplicado sobre os pontos da imagem de satélite (Figura 7d), após isso foi realizada a mediana da umidade estimada e então esse resultado foi comparado com os dados reais.

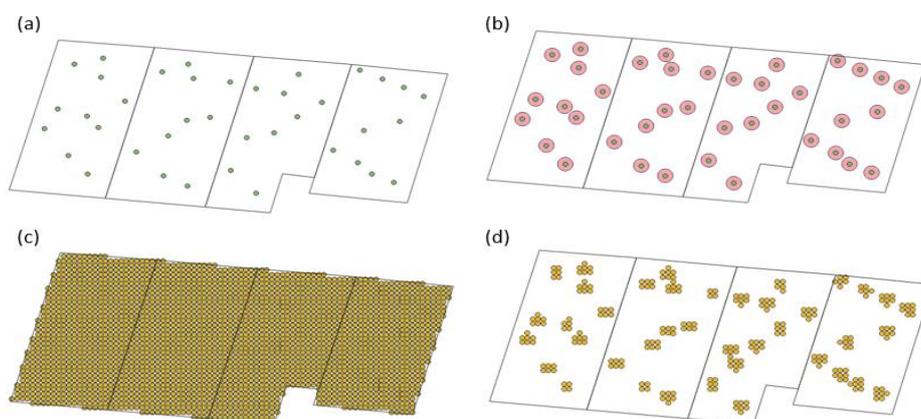


Figura 7. Preparação dos dados para as avaliações. Pontos amostrais coletados em campo (a). Buffer de 40m realizado sobre os pontos amostrais coletados em campo (b). Centroides de cada pixel da imagem de satélite (c). Aplicação do buffer na imagem de satélite (d).

3.6. Métricas de avaliação

Para as avaliações estatísticas utilizou-se o índice de concordância de Willmott (d) (equação 15) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE, sigla em inglês para Root Mean Square Error) (equação 16).

O índice “d”, proposto por Willmott et al. (1985) avalia o ajuste do modelo em relação aos dados observados, indicando o grau de concordância ou exatidão entre os valores estimados e observados, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor a exatidão do desempenho do modelo em prever a variável dependente. Este índice foi calculado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Y_e - Y)^2}{\sum(|Y_e - \bar{Y}| + |Y - \bar{Y}|)^2} \right] \text{(equação 15)}$$

Em que:

Y_e = Valores estimados

Y = Valores observados

\bar{Y} = Valores médios total

A RMSE é uma das medidas de erro mais comumente usada para aferir a qualidade do ajuste de um modelo, representa a raiz do erro médio quadrático da diferença entre a predição e o valor real, sendo uma medida análoga ao desvio padrão.

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum(Y - Y_e)^2} \text{(equação 16)}$$

Em que:

n = número de observações

Y_e = Valores estimados

Y = Valores observados

3.7. Fluxograma metodológico

O arranjo geral da metodologia está ilustrado na Figura 8.

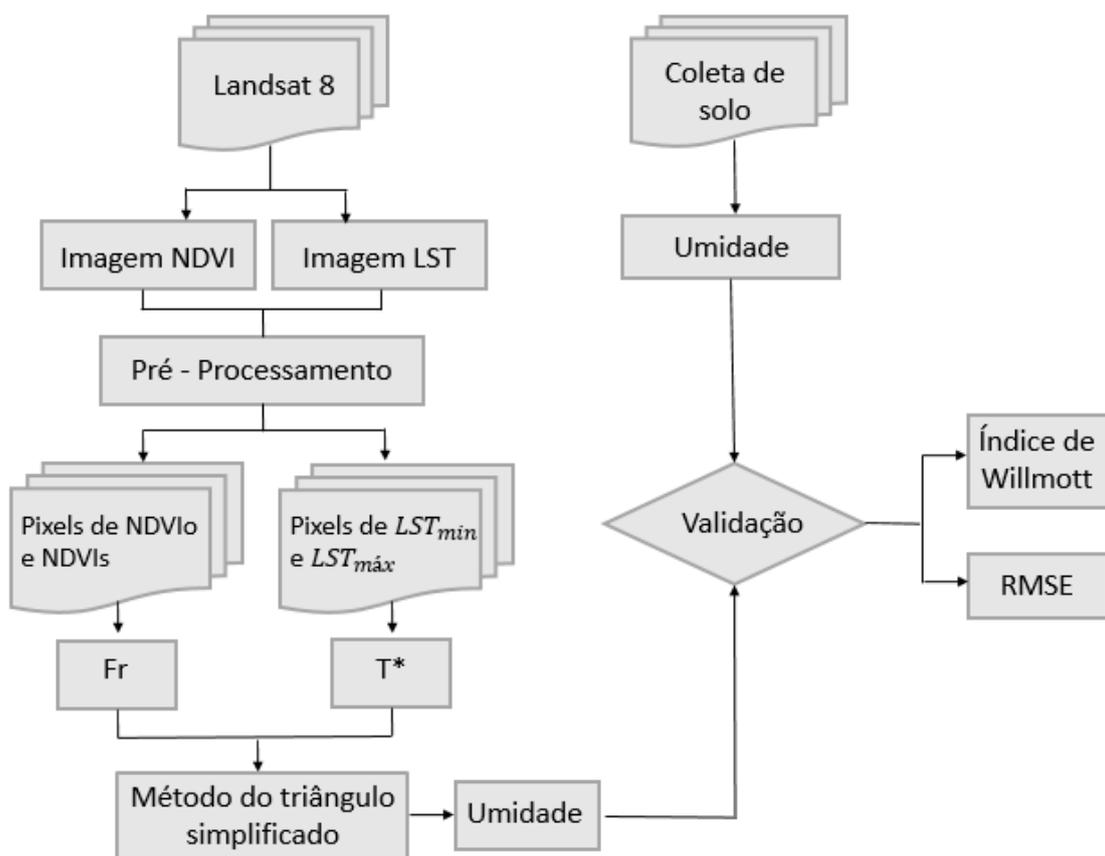


Figura 8. Fluxograma metodológico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Método do triângulo

O gráfico de dispersão dos pixels gerado pelo método do triângulo simplificado encontra-se ilustrado na Figura 9. Nota-se a configuração triangular delimitada pela linha tracejada em azul (borda fria) e a linha tracejada em vermelho (borda quente).

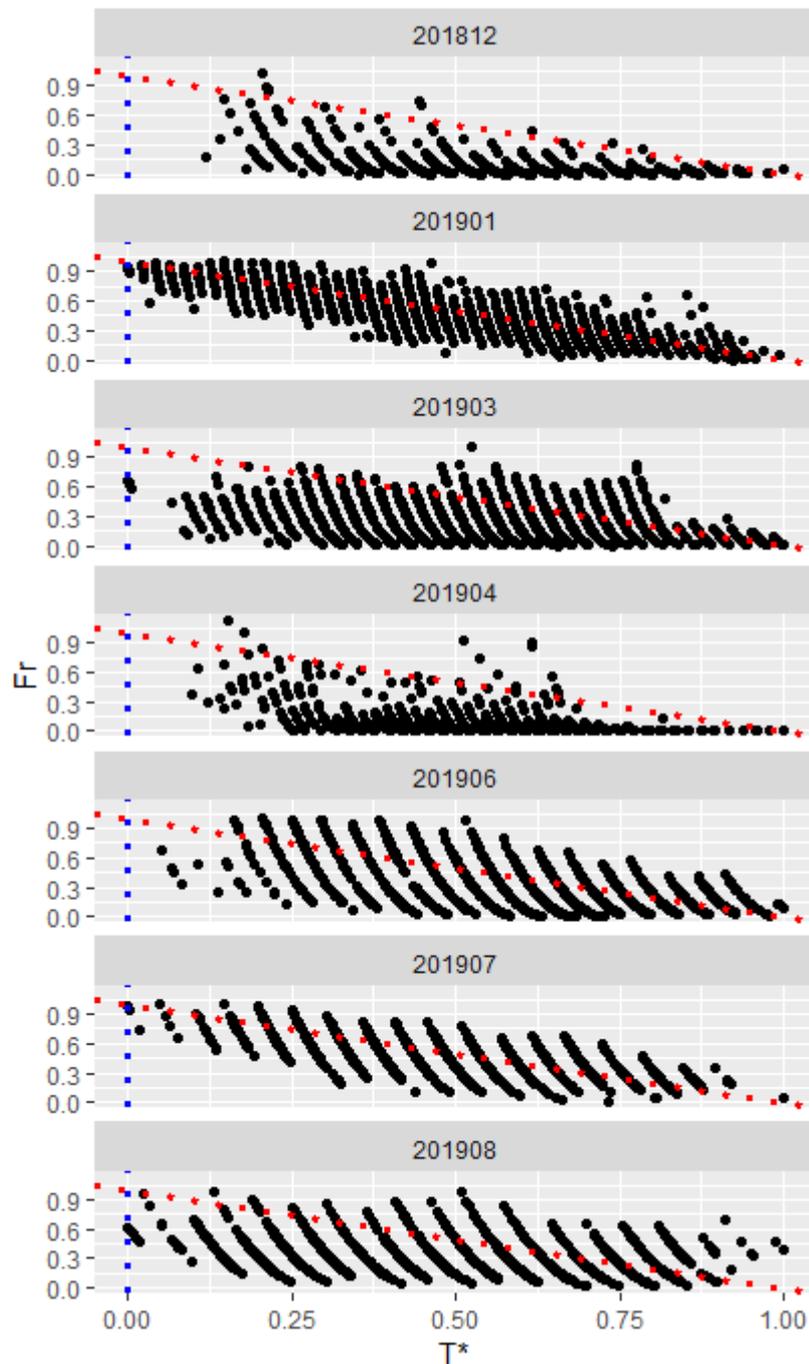


Figura 9. Gráfico de dispersão gerado pelo método do triângulo para os meses de dezembro de 2018 (201812), janeiro de 2019 (201901), março de 2019 (201903), abril de 2019 (201904), junho de 2019 (201906), julho de 2019 (201907) e agosto de 2019 (201908).

A variação dos arranjos dos pixels nos gráficos é influenciada pelo manejo da área no mês de aquisição da imagem, já que de acordo com a

época do plantio, colheita ou presença de gado a vegetação pode estar mais ou menos desenvolvida, assim como o solo pode estar exposto ou não.

Segundo Carlson (2013), durante os meses com a maior quantidade de solo exposto, a borda quente tem muito mais pixels perto da parte inferior do gráfico, o que pode ser observado nos meses referentes ao início de desenvolvimento da soja (dezembro de 2018) e meses referentes à época de colheita da soja e plantio da pastagem (abril de 2019), também constatados por Fuzzo e Rocha (2018).

Nos meses de janeiro, fevereiro e março a soja está em desenvolvimento, assim os pixels tendem a se agrupar perto da parte superior do gráfico, comportamento esperado nos meses de crescimento (janeiro e fevereiro) e maior pico vegetativo da soja (FUZZO e ROCHA, 2018), já que com o desenvolvimento da cultura os valores de NDVI seguem uma tendência crescente, pois os mesmos relacionam-se diretamente com o aumento da biomassa em função da maior área verde promovendo aumento na taxa fotossintética (BELTRÃO et al., 2007).

A área de estudo é manejada de acordo com os meses e subdivida em 4 talhões, em que diferentes variedades de soja foram plantadas e diferentes manejos de pastagem com rotação de gado são implementados ao decorrer do ano.

A representação do método do triângulo simplificado de acordo com a divisão dos talhões pode ser observada na Figura 10.

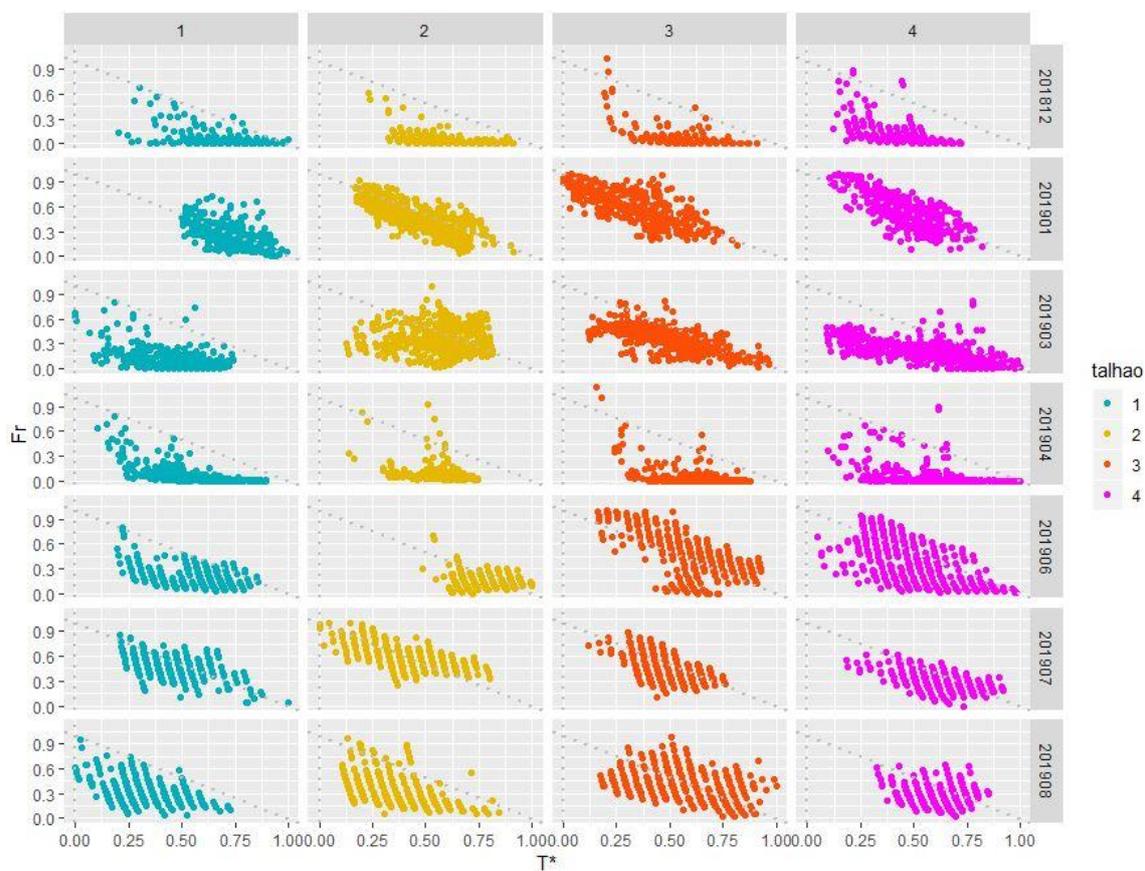


Figura 10. Gráfico de dispersão gerado pelo método do triângulo para cada talhão, nos meses de dezembro de 2018 (201812), janeiro de 2019 (201901), março de 2019 (201903), abril de 2019 (201904), junho de 2019 (201906), julho de 2019 (201907) e agosto de 2019 (201908).

A semeadura da soja ocorreu no mês de novembro, assim no mês de dezembro ainda há maior predominância de solo exposto em todos os talhões, já que a cultura está no início do ciclo fenológico.

No mês de março, período em que ocorre o grau de maturação, observa-se que os talhões 3 e 4 possuem um padrão similar entre eles, com maiores valores de NDVI, diferente dos talhões 1 e 2, isso devido ao fato das variedades de soja selecionadas para o talhão 1 e 2 serem a BRS 7380 RR e AS 3730 IPRO, respectivamente, e a variedade dos talhões 3 e 4 ser a NS 6700. Borges, et al. (2018) obtiveram maiores valores de plantas para as mesmas variedades dos talhões 3 e 4 e em seguida para o talhão 2 e por último para o talhão 1, no dia da colheita da soja.

A maior altura das plantas está relacionada com maiores valores de NDVI (THENKABAIL, et al., 2000). Motomiya, et al., (2009), avaliaram a relação entre o NDVI e a altura de plantas de algodão e encontraram um r^2 de 0,74. Isso porque a altura das plantas influencia na reflectância da vegetação, explicando os maiores valores de NDVI para os talhões 3 e 4 e em seguida para os talhões 2 e 1.

Logo após a colheita da soja e posterior plantio da pastagem, no mês de abril, nota-se novamente o comportamento de solo exposto em todos os talhões, ou seja, predominância de pixels na parte inferior dos gráficos.

O manejo da pastagem ocorre de formas diferentes de acordo com o talhão, sendo que o gado não está presente na área durante todo o período, já que ocorre rotação dos animais entre os talhões. O resumo do manejo dos talhões pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4. Período de entrada e saída do gado, assim como a quantidade de animais para cada período e a quantidade de animais por hectare (nº animais /ha).

Talhão	Entrada	Saída	nº animais	nº animais/ha
1	MAIO	JUNHO	255	4,9
	AGOSTO	OUTUBRO	89	1,7
2	MAIO	MAIO	103	1,9
	MAIO	JUNHO	205	3,8
	AGOSTO	OUTUBRO	85	1,6
3	MAIO	JUNHO	168	3,5
	JUNHO	JUNHO	205	4,2
	AGOSTO	OUTUBRO	54	1,1
4	MAIO	JUNHO	163	3,6
	JUNHO	JUNHO	76	1,7
	AGOSTO	OUTUBRO	78	1,7

A presença de gado nos talhões reflete na diminuição da biomassa da pastagem e assim o deslocamento de alguns pixels para a parte inferior do triângulo, o que pode ser observado nos meses de junho e agosto. Observa-se maiores quantidades de pixels na parte inferior no mês de junho do que no mês de agosto, devido ao fato da quantidade total de animais que ocuparam os talhões serem menores no mês de agosto.

No mês de junho percebe-se que os talhões 1 e 2 possuem menor biomassa que os talhões 3 e 4 devido ao fato da área ter sido roçada, assim a imagem de satélite, que foi adquirida antes desse evento nos talhões 3 e 4 não reflete a influência na biomassa, causada pelo manejo apresentado. Analisando o mês de julho percebe-se que o pasto volta a se recuperar e acumular biomassa.

A análise promovida pelo método do triângulo permite identificar os diferentes manejos na área ao decorrer dos meses, sendo uma ferramenta importante para a compreensão e gestão da área. Uma conclusão semelhante de que T^* e Fr são influenciadas pela variação espacial também foi atingida por Friedl e Davis (1994), que observaram uma correlação negativa entre a T^* e Fr em diferentes meses, em locais com coberturas mistas de capim e solo exposto. Nesse contexto, observaram que a relação entre a T^* e a Fr depende do tipo de cobertura do solo, e uma proporção significativa da variação total na Fr e T^* foi explicada estratificando os dados por classe de cobertura do solo.

4.2. Umidade

Os mapas ilustrados na Figura 11 permitem identificar a variabilidade espacial da disponibilidade de umidade em toda a área de estudo.

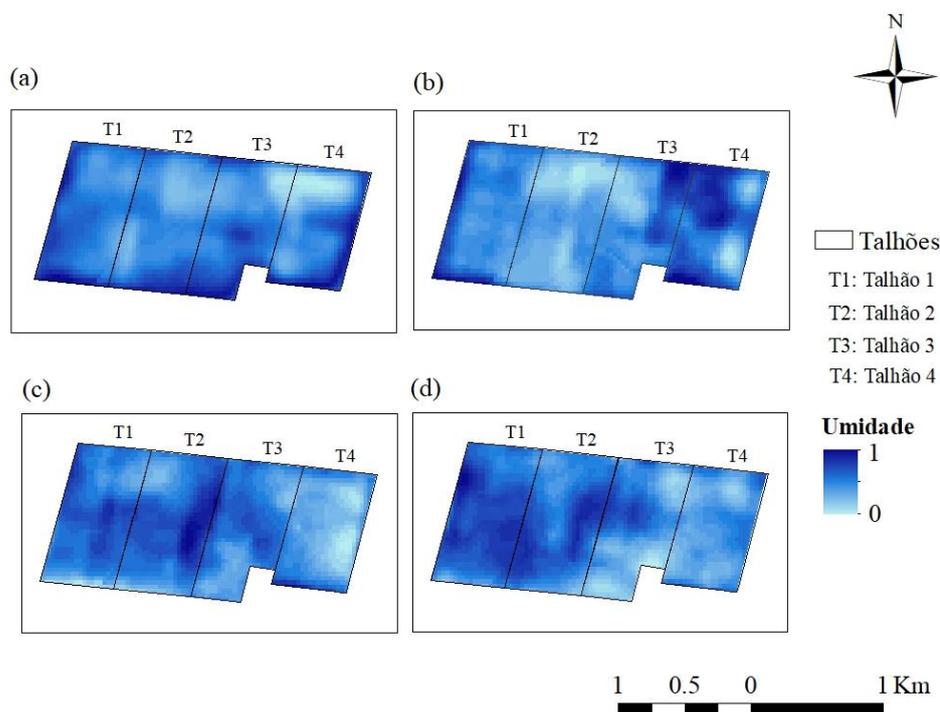


Figura 11. Estimativa da Mo obtida pelo método do triângulo simplificado para os meses de março (201903) (a), junho (201906) (b), julho (201907) (c) e agosto (201908) (d).

Ao decorrer dos meses e de acordo com os talhões percebe-se manchas mais claras, que indicam menor disponibilidade de umidade e manchas escuras que indicam maior disponibilidade de umidade. Essas manchas podem ser derivadas da textura heterogênea da área de estudo, já que a quantidade de areia, argila e matéria orgânica influenciam o conteúdo de água no solo, sendo que para os solos com maior quantidade de argila e matéria orgânica ocorre maior retenção de água e o contrário ocorre em solos arenosos, onde ocorrem altas taxas de perdas de água (MELLO et al., 2005), além disso o nível de compactação do solo também contribui para a mudança na quantidade de água retida (SILVA et al., 1986), ocorrendo menor taxa de infiltração em solos compactados do que não compactados (GHILDYAL e SATYANARAYAMA, 1965).

Embora as condições climáticas controlem de maneira absoluta as relações planta-água, já que a maior quantidade de chuva implica em maior quantidade de água, os solos regulam a dinâmica da água, a mantendo contra

forças gravitacionais, influenciando sua disponibilidade (CORRÊA, et al., 2019)

Os valores do índice “d” (Figura 12) e de RMSE (Figura 13) são bem variáveis em função dos pontos amostrais de solo (ID), sendo essa variação mais expressiva nos meses de março e junho do que em julho e agosto. No mês de junho não foi realizada coleta de dados nos talhões 3 e 4 em função da presença de gado nessas áreas no momento da coleta, com isso, não foi possível calcular o índice “d” e RMSE para esse período nos talhões em questão.

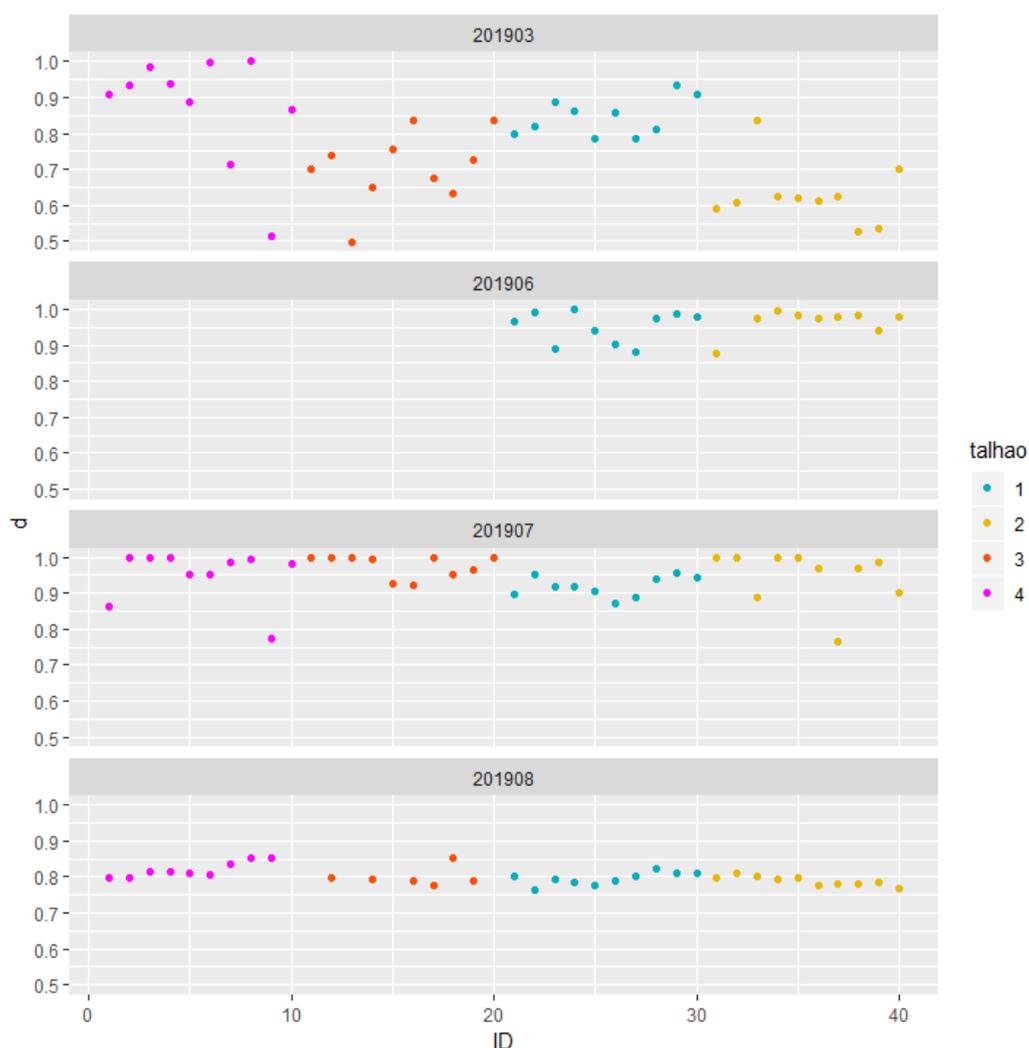


Figura 12. Índice de concordância de Wilmott para os meses de março (201903), junho (201906), julho (201906) e agosto (201908) de 2019, para cada ponto amostral de solo (ID).

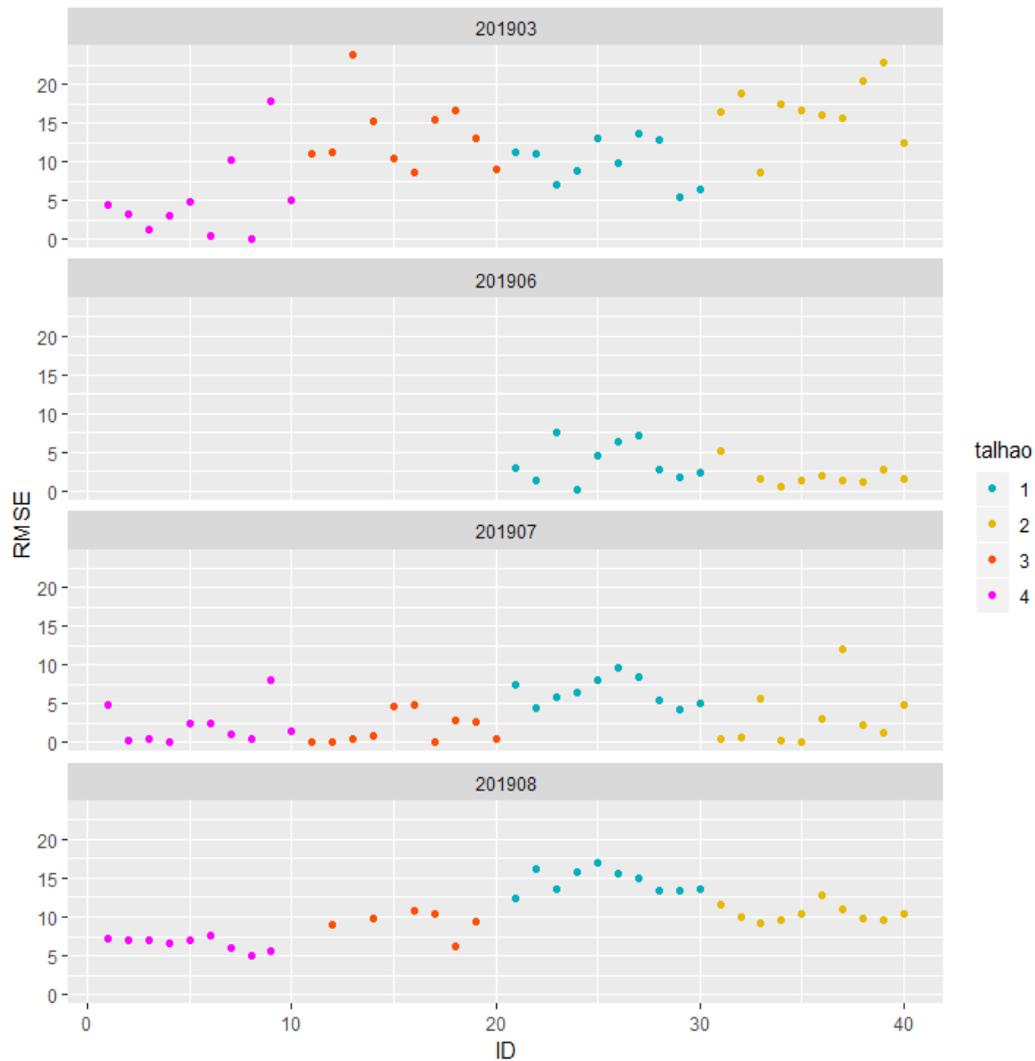


Figura 13. RMSE obtido para os meses de março (201903), junho (201906), julho (201907) e agosto de 2019 (201908), para cada ponto amostral de solo (ID).

As maiores variações foram encontradas principalmente nos meses chuvosos (março), isso pode ser devido ao fato da área de estudo ter uma textura heterogênea com bolsões de solo arenoso, onde ocorre altas taxas de perdas de água resultantes de evaporação do solo e infiltração rápida que esgotam rapidamente a disponibilidade de água para o suprimento de plantas (BLANCO-CANQUI, 2009), assim devido à baixa taxa de revisita do satélite o mesmo pode captar uma variabilidade que não seja a mesma da coletada em campo.

O mês de agosto possui valores mais estáveis, principalmente em relação ao índice “d”, que avalia o ajuste do modelo em relação aos dados observados, atribui-se esse comportamento ao fato de que nos meses de seca a taxa de revisita do satélite acaba não tendo a mesma interferência que nos meses chuvosos, já que a disponibilidade de umidade tende a ser mais estável.

No geral, os valores do índice “d” oscilaram entre 0,61 e 0,99, já os valores de RMSE entre 0 e 17%. Devido à grande variabilidade entre os ID’s do campo, calculou-se os valores medianos do RMSE e do índice “d” em função do talhão (Tabela 5), possibilitando assim a compreensão do comportamento generalizado dos dados de acordo com as datas das imagens.

Tabela 5. Valores de RMSE e índice “d”, em função dos talhões para os meses de março (201903), junho (201906), julho (201907) e agosto (201908).

Talhão	201903		201906		201907		201908	
	RMSE (%)	Índice “d”						
1	9.911	0.844	3.660	0.951	6.550	0.919	14.599	0.796
2	16.560	0.627	1.953	0.965	3.060	0.947	10.434	0.788
3	13.450	0.705	-	-	1.720	0.976	9.290	0.799
4	5.020	0.875	-	-	2.208	0.950	6.570	0.820

No geral para os meses de seca (junho, julho e agosto) as estimativas para os talhões 3 e 4 apresentaram melhor desempenho, isso devido ao fato da roçagem ter ocorrido em junho primeiro nos talhões 1 e 2, assim o gado entra primeiro nesses talhões e depois nos talhões 3 e 4, portanto quando ocorre a coleta da imagem ainda há maior cobertura do solo nessas áreas, o que mantém a umidade nesses talhões e, apesar da data de passagem do satélite não coincidir com a data de coleta do solo em campo, os valores obtidos são próximos, gerando menores erros.

Dentre os meses, os resultados dos talhões 3 e 4 para o mês de julho, são os de menores valores de RMSE e maiores valores de índice “d”. Apesar do manejo do mês ser apenas a pastagem, o fato das taxas de lotação animal no mês anterior serem maiores, pode-se ter gerado um aumento da densidade do solo pelo pisoteio animal, reduzindo a porosidade total e a macroporosidade (STONE et al. 2002), o que aumenta o número de poros pequenos que permanecem cheios de água (GHILDYAL e SATYANARAYAMA, 1965), afetando a condutividade hidráulica do solo e assim a taxa de infiltração acaba sendo menor e por consequência as estimativas da umidade ficam mais próximas das coletadas em campo.

No mês de chuva (março) em que há maior quantidade de água disponível no solo, o talhão 1 está entre os talhões com o melhor desempenho, isso pode ser explicado devido a maior quantidade de argila encontrada nessa área, que gera maior contato entre áreas das partículas sólidas e a água, o que provoca maior retenção (REICHARDT, 1987), diferentemente dos talhões com mais areia, onde ocorre maiores taxas de infiltração de água (BLANCO-CANQUI, 2009), assim nas áreas de maior retenção as estimativas de umidade ficam mais próximas dos valores coletados em campo.

Além dos dados de precipitação que permitem identificar os meses chuvosos e secos, a textura e o manejo da área também possibilitam a compreensão do comportamento da umidade do solo, pois de acordo com a cobertura vegetal, presença ou ausência de animais a retenção da umidade se comporta de forma diferente (WANG et al. 2010; CASTIONI et al. 2018) e pode não captar a mesma variabilidade coletada pelas imagens.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo estimar a umidade do solo em uma área de integração lavoura-pecuária pelo método do triângulo simplificado. Esse método permitiu realizar a estimativa da umidade superficial do solo de forma espacial e contínua, de acordo com a disponibilidade das imagens de satélite, também foi possível a identificação dos diferentes manejos na área ao

decorrer dos meses. Ao final, obtivemos um mapa de variação espaço-temporal da umidade do solo com boa confiabilidade.

Para a estimativa da umidade mais acurada ainda é necessário a utilização de dados de campo, como os valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, além disso também se faz necessário a utilização de dados climáticos, como a precipitação, para a verificação de períodos chuvosos. Outro ponto importante é obter dados de sensoriamento remoto com menor taxa de revisita, isso poderia diminuir a probabilidade de ocorrência de dados faltantes em função de nuvens ou interferências do próprio sensor.

O método apresentou-se como uma ferramenta importante para a compreensão espacializada do comportamento da umidade, de forma simples, bem como a compreensão do manejo da área, sendo especialmente útil para pesquisas de grandes regiões onde pouco ou nenhum dado de superfície estão disponíveis.

6. REFERÊNCIAS

ARCO, E.D.; ALVARENGA, B.S.; MOURA, P.; TEIXEIRA, C.G. **Estudos de refletância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Anais... Belo Horizonte: INPE, p. 2327-2334. 2003.

ATZBERGER, C. **Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs.** Remote Sensing, v. 5, n. 2, p. 949-98. 2013.

ÁVILA, L.F.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. da. **Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em Bacia Hidrográfica da Serra da Mantiqueira.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.1257-1266. 2010.

BALBINO, L.C.; DI STEFANO, J.G. **Projet PROCITROPICOS: intégration de l'agriculture et de l'élevage par les systèmes de semis direct.** In:

RASOLO, F.; RAUNET, M. Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Montpellier: CIRAD. p.409-417. 1999

BALBINO, L.C.; BROSSARD, M.; LEPRUN, J.C.; BRUAND, A. **Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques: une étude bibliographique.** Étude et Gestion des Sols, v.9, p.83-104. 2002.

BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A.O.; STONE, L.F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF).** Brasília: Embrapa, 130p. 2011.

BALBINO, L.C.; CORDEIRO, L.A.M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P.R.; VILELA, L. **Agricultura sustentável por meio da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF).** International plant nutrition institute, 2012.

BAUP, F.; MOUGIN, E.; ROSNAY, P.; TIMOUK, F.; CHÊNERIE, I. **Surface soil moisture estimation over the AMMA Sahelian site in Mali using ENVISAT/ASAR data.** Remote Sensing of Environment, v.109, p.473-481. 2007.

BELTRÃO, N.E.M.; CARDOSO, G.D.; VALE, L.S. **Balço energético e “sequestro” de carbono em culturas oleaginosas.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 22 p. 2007.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. **Crop residue removal impacts.** p.139–163, 2009.

BRUNSELL, N.A.; PONTES, P.P.B.; LAMPARELLI, R.A.C. **Remotely Sensed Phenology of Coffee and Its Relationship to Yield.** GIScience and Remote Sensing, v.46, n.3, p. 1-16, 2009.

BORGES, W.L.B.; SANTOS, G.X.L.; BÁRBARO-TORNELI, I.M.; FINOTO, E.L.; FREITAS, R.S.; MATEUS, G.P.; HIPÓLITO, J.L.; TOKUDA, F.S.;

CAZENTINI-FILHO, G.; TREVISOLI, S.H.U.; TICELLI, M.; GASPARINO, A.C.; CASTELETI, M.L.; TOMAZINI, N.R.; LEÃO, P.C.L. **Avaliação Regional de cultivares da soja no estado de São Paulo - Safra 2017/18**. 3º Encontro técnico sobre as culturas da soja e do milho no noroeste paulista, 2018.

CARLSON, T.N.; GILLIES, R.; PERRY, E. **A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover**. Remote Sensing Reviews, v.9, p.161–173. 1994.

CARLSON, T.N.; GILLIES, R.; SCHMUGGE, T. **An interpretation of methodologies for indirect measurements of soil water contents**. Agricultural and Forest Meteorology, v.77, p.191–205. 1995.

CARLSON, T.N. GILLIES, R.R. **Thermal Remote Sensing of Surface Soil Water Content with Partial Vegetation Cover for Incorporation into Climate Models**. Journal of Applied Meteorology. v.34, 1995.

CARLSON, T.; RIPLEY, D. **On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index**. Remote Sensing of Environment. V,62, p. 241-252. 1997.

CARLSON, T.N.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G.A. **Satellite remote sensing of land use changes in and around San José, Costa Rica**. Remote Sensing of Environment. v.70, p. 247–56. 1999.

CARLSON, T.N. **An overview of the “triangle method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery**. Sensors, v.7, n8. p 1612– 1629. 2007.

CARLSON, T.N. **Triangle Models and Misconceptions**. International Journal of Remote Sensing Applications. v. 3, n. 3, p.155-158. 2013.

CARLSON, T.N.; PETROPOULOS, G.P. **A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: the simplified triangle.** International Journal of Remote Sensing, 2019. DOI:10.1080/01431161.2019.1601288

CASSOL, L.C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 143p. 2003.

CASTIONI, G.A.; CHERUBIN, M.R.; MENANDRO, L.M.S. **Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: a multi-approach assessment.** Soil and Tillage Research, v. 184. p.301–309, 2018.

CORRÊA, S.T.R.; BARBOSA, L.C.; MENANDRO, L.M.S.; SCARPARE, F.V.; REICHARDT, K.; MORAES, L.O.; HERNANDES, T.A.D.; FRANCO, H.C.J.; CARVALHO, J.L.N.C. **Straw Removal Effects on Soil Water Dynamics, Soil Temperature, and Sugarcane Yield in South-Central Brazil.** BioEnergy Research, 15p. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09981-w>

CORSI, M.; MARTHA-JUNIOR, G.B.; PAGOTTO, D.S. **Sistema radicular: dinâmica e resposta a regimes de desfolha.** In: DA SILVA, S.C.; PEDREIRA, C.G.S. (Ed.). A produção animal na visão dos brasileiros – pastagens. Piracicaba: FEALQ. p.838-852. 2001.

COSTA, J.L; S.; RAVA, C.A. **Influência da braquiária no manejo de doenças do feijoeiro com origem no solo.** In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. (Ed.). Integração lavoura-pecuária. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p.523-533. 2003.

DAS, N.N.; MOHANTY, B.P. **Temporal dynamics of PSR-based soil moisture across spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02: A wavelet approach.** Remote Sensing of Environment, v.112, p.522-534. 2008.

DE JEU, R.; WAGNER, W.; HOMES, T.R.H.; DOLMAN, A.J.; VAN DE GIESEN, N.C.; FRIESEN, J. **Global soil moisture patterns observed by spaceborne microwave radiometers and scatterometers**. *Surv.Geophys.* v.29, n.4–5, p. 399–420. 2008.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2005.

FORMAGGIO, A.R.; SANCHES, I.D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de textos, 2017. ISBN 978-85-7975-277-3.

FRIEDL, M.A.; DAVIS, F.W. **Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie**. *Remote Sensing of Environment*, 48, p.1-17. 1994.

FUZZO, D.F.S; ROCHA, J.V. **Simplify the triangle method for estimating evapotranspiration and its use in agrometeorological modeling**. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, Guarapuava-PR, v.11, n.1, p.07- 15, 2018. DOI: 10.5935/PAeT.V11.N1.01

GHILDYAL, B.P.; SATYANARAYAMA, T. **Effects of soil compaction on the physical properties of four different soils**. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, New Delhi, v.13. p.149-155, 1965.

GHOLZ, H.L. **Agroforestry: realities, possibilities and potentials**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers. 227p. 1987.

GILLIES, R.; CARLSON, T.; KUSTAS, W.; HUMES, K. **A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature**. *International Journal of Remote Sensing*, v18, p.3145– 3166. 1997.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. **“Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone”** Remote Sens. Environ. 202, 18–27, 2017.

GUO, L.B; GIFFORD, R.M. **Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis.** Global Change Biology, v.8 p.345-360, 2002.

HASSAN, Q.K.; BOURQUE, C.P.A.; MENG, F.R.; COX, R.M. **A wetness index using terrain-corrected surface temperature and normalized difference vegetation index derived from Standard MODIS Products: An evaluation of its use in a humid forest-dominated region of eastern. Canada.** Sensors, v.7, p.2028-2048. 2007.

HAVLÍK, P.; VALIN, H.; HERRERO, M.; OBERSTEINER, M.; SCHMID, E.; RUFINO, M.C. **Climate change mitigation through livestock system transitions.** In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. v. 111, p. 3709–3714. 2014.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; MARIA, I.C.; CASTRO, FILHO, C.; LANDERS, J.N. **A erosão e o seu impacto.** In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J.R.R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos p.47-60. 2002.

HERRERO, M.; THORNTON, P.K.; NOTENBAERT, A.M.; WOOD, S.; MSANGI, S.; FREEMAN, H.A.; BOSSIO, D.; DIXON, J.; PETERS, M.; STEEG, J.; LYNAM, J.; RAO, P.P.; MACMILAN, S.; GERARD, B.; MCDERMOTT, J.; SERÉ, C.; ROSEGRANT, M. **Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop- Livestock Systems.** Science, v.327, p.822–825. 2010.

HERRERO, M.; HAVLIK, P.; VALIN, H.; NOTENBAERT, A.; RUFINO, M.C.; THORNTON, P.K.; BLUMMEL, M.; WEISS, F.; GRACE, D.; OBERSTEINER, M. **Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas**

emissions from global livestock systems. Proceedings of the National Academy of Sciences. v.110, p.20888-20893. 2013.

HOLBEN, B.N. **Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data.** International Journal of Remote Sensing, v.7, n.11, p.1417-1435. 1986.

HUETE, A.R. **A Soil-adjust vegetation index (SAVI).** Remote Sensing of Environment, v. 25, p.295-309. 1988.

JAKUBAUSKAS, M.E.; LEGATES, D.R.; KASTENS, J.H. **Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 37, p. 127-139. 2002.

KASTENS, J.H.; KASTENS, T.L.; KASTENS, D.L.A.; PRICE, K.P.; MARTINKO, E.A.; LEE, R.Y. **Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery classification in the U.S. Central Great Plains.** Remote Sensing of Environment, v. 99, p. 341-356. 2005.

KATRA, I.; BLUMBERG, D.G.; LAVEE, H.; SARAH, P. **Topsoil moisture patterns on arid hillsides - Micro-scale mapping by thermal infrared images.** Journal of Hydrology, v.334, p.359-367, 2007.

KOPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes.** Wall-map 150cmx200cm, 1928.

KOSTER, R.D.; SUD, Y.C.; GUO, Z.;DIRMEYER, P.A.; BONAN, G.;OLESON, K.W.; CHAN, E.; VERSEGHY, D.; COX, P.; DAVIES, H.; KOWALCZYK, E.; GORDON, C.T.; KANAE, S.; LAWRENCE, D.;LIU, P.; MACKO, D.; LU, C.H.; MITCHELL, K.; MALYSHEV, S.; MCAVANEY, B.; OKI, T.; YAMADA, T.; PITMAN, A.; TAYLOR, C.M.; VASIC, R.; XUE, Y..**GLACE: The Global Land-Atmosphere Coupling Experiment.** Part I: Overview. J. Hydrometeor.,v.7, p.590–610, 2006. DOI::<https://doi.org/10.1175/JHM510.1>.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. **Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.1131-1140, 2007.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 4 th ed. Madison: University of Wisconsin. 750 p.,1999.

LOPES, H.L.; ACCIOLY, L.J.O.; SILVA, F.H.B.B; SOBRAL, M.C.M.; ARÚJO-FILHO, J.C.; CANDEIAS, A.L.B. **Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.9, p.973-980, 2011.

LUIZ, A.J.B.; OLIVEIRA, J.C.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. **Auxílio das imagens de satélite aos levantamentos por amostragem em agricultura**. Agric., v. 49, p. 41 -54, 2002.

MACEDO, M.C.M. **Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal**. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO EM PASTAGENS, 18., 2001, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ. p.257-283., 2001.

MACEDO, M.C.M. **Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas**. EMBRAPA- Gado de Corte. Campo Grande, MS.R. Bras. Zootec., v.38, p.133-146, 2009.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SÁ, M.A.C. de; VILELA, L.; BECQUER, T. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.42, p.873-882, 2007.

MARQUES, L.S.; MELLO, F.R.; CHAVES, J.M. **Mapeamento de uso e cobertura do solo no município de Jeremoabo (BA) por meio de**

Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, p.13. Viçosa, 2009.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, D.F.; LIMA, J.M.; LOPES, D. **Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, p.23-29, 2005.

MORAES, E.C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE. 2002. Disponível em: <<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1E CMoraes.pdf>. >

MURRAY, T.; VERHOEF, A. **Moving towards a more mechanistic approach in the determination of soil heat flux from remote measurements. I. A universal approach to calculate thermal inertia.** Agricultural and Forest Meteorology. v. 147, p. 80–87, 2007.

MOTOMIYA, A.V.A.; MOLIN, J.P.; CHIAVEGATO, E.J. **Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro.** Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 137-145, 2009.

NAGLER, P.L.; CLEVERLY, J.; GLENN, E.; LAMPKIN, D.; HUETE, A.; WAN, Z. **Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data.** Remote Sensing of Environment, v.94, n.1, p.17–30, 2005.

PEREIRA, L.S.; VALERO, J.A.J.; BUENDÍA, M.R.P.; MARTÍN-BENITO, J.M.T. **El riego e sus tecnologías.** Albacete: CREA-UCLM, 296p, 2010.

PETROPOULOS, G.; CARLSON, T.N.; WOOSTER, M.J.; ISLAM, S. **A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture.** Progress in Physical Geography. v.33, p.224-250, 2009.

PONZONI, F.J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: MENESES, P.R.; MADEIRA-NETO, J.S., (Eds). Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais. Brasília: UNB/EMBRAPA, 2001.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole. 188p. 1987.

RODRIGUEZ-ITURBE, I., ENTEKHABI, D.; BRAS, R.L. **Nonlinear dynamics of soil moisture at climate scales 1**. Stochastic analysis. Water Resource. Res. v. 27, n.8, p.1899–1906, 1991.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: ERTS-1 Symposium, 3, 10-14 December, Washington, DC. Proceedings. Washington, NASA SP-351, p. 309-317, 1973.

SAAVEDRA, O.F.C. **Estimativa da umidade do solo através de séries temporais de NDVI e LST na planície de inundação da Ilha do Bananal**. INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/07.13.21.24-TDI. São José dos Campos, 2016.

SALTON, J. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SANCHES, I.D.A.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. **Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat**. Agric., v. 52, n. 1, 14p, São Paulo, 2005.

SENEVIRATNE, S.I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E.B.; LEHNER, I.; ORLOWSSKY, B.; TEULING, A.J. **Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review**. Earth-Science Reviews, v. 99, p. 125–61, 2010.

SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese. 144p., 2007.

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. **Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos**. Revista. Brasileira de Ciência do Solo, p.91-95, 1986.

SPARKS, A.H. Nasapower: A NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R. Journal of Open Source Software, 2018.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. **Compactação do solo na cultura do feijoeiro**. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, p.207-212, 2002.

SUN, D.; PINKER, R.T. **Case study of soil moisture effect on land surface temperature retrieval**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v 1, p.127-130, 2004.

TANG, R.; LI, Z.-L.; TANG, B. **An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and Validation**. Remote Sensing of Environment, v.114, n. 3, p.3, p.– 551, 2010.

TEULING, A.J.; HIRSCHI, M.; OHMURA, A.; WILD, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; BUCHMANN, N.; AMMANN, C.; MONTAGNANI, L.; RICHARDSON, A.D.; WOHLFAHRT, G.; SENEVIRATNE, S.I. **A regional perspective on trends in continental evaporation**. Geophysics. Res. Lett.v.36, n. L02404, 2009.

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; DE PAUW, E. **Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics**. Remote Sensing of Environment, v. 71, n. 2, p. 158–182, fev. 2000.

USGS. **LANDSAT 8 Surface reflectance code (LASRC) - Product guide.** Landsat Surface Reflectance products courtesy of the U.S. Geological Survey, 2018.

USDA. United States Department of Agriculture. **Textural Soil Classification.** Washington, DC, 1987.

VILELA, L.; MACEDO, M.C.M.; MARTHA JUNIOR, G.B.; KLUTHCOUSKI, J. **Benefícios da integração lavoura-pecuária.** In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. (Ed.). *Integração lavoura-pecuária.* Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. p.143-170, 2003.

VILELA, L.; MARTHA-JUNIOR, G.B.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; GUIMARÃES-JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. **Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v.46, p.1127-1138, 2011.

VIVONI, E.R.; GEBREMICHAEL, M.; WATTS, C.J.; BINDLISH, R.; JACKSON, T.J. **Comparison of ground-based and remotely sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04.** *Remote Sensing of Environment,* v.112, p.314-325, 2008.

WAGNER, W.; LEMOINE, G.; ROTT, H. **A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data.** *Remote Sens. Environ.* 70, 191–207, 1999.

WANG, H.; LI, X; LONG, H; XU, X; BAO, Y. **Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: A case study in China.** *Catena,* v.82. p.135-145, 2010.

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L.; KASTENS, J.H. **Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains.** *Remote Sensing of Environment,* v. 108, p. 290-310, 2007.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMANN, A.H. **Vegetation indices in crop assessments.** Remote Sensing of Environment, v.35, p.105-119, 1991.

WILKINS, R.J. **Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems.** Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences, v.363, p.517-525, 2008.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J. **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal of Geography Research. v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

YANG, Y.; GUAN, H.; LONG, D.; LIU, B.; QIN, G.; QIN, J.; BATELAAN, O. **Estimation of Surface Soil Moisture from Thermal Infrared Remote Sensing Using an Improved Trapezoid Method.** Remote Sensing.v.7, p.8250–8270, 2015.

ZENG, Y.; FENG, Z.; XIANGA, N. **Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment.** IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, v.6, p.4036-4039, 2004.

ZHAN, Z.; QIN, Q.; WANG, X. **The application of LST/NDVI index for monitoring land surface moisture in semiarid area.** IEEE Transactions on geosciences and Remote Sensing, v.3, p.1551-1554, 2004.